

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

O CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO EM 2D GERADO POR
LINHAS DE TRANSMISSÃO E O EFEITO EM SERES VIVOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ANTONIO CARLOS PINHO

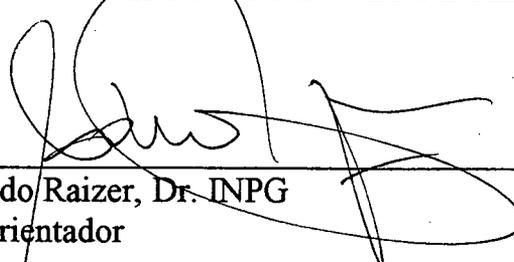
FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1994

O CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO EM 2D GERADO POR LINHAS DE
TRANSMISSÃO E O EFEITO EM SERES VIVOS

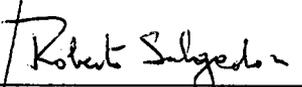
ANTONIO CARLOS PINHO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, CONCEPÇÃO E ANÁLISE DE
DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

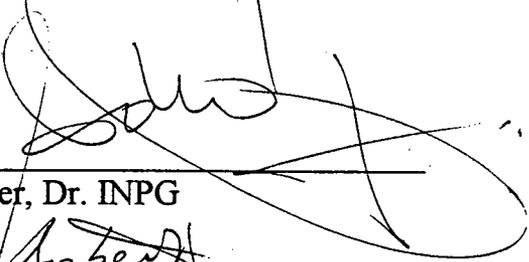


Prof. Adroaldo Raizer, Dr. INPG
Orientador

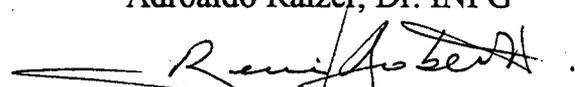


Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph. D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA



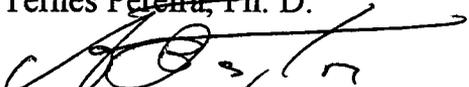
Adroaldo Raizer, Dr. INPG



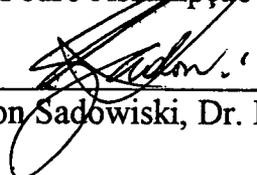
René Robert, Dr.



Elisete Ternes Pereira, Ph. D.



João Pedro Assumpção Bastos, Dr. d'ETAT



Nelson Sadowiski, Dr. INPT

À Danielle
Por seu amor e carinho
constantemente, sem os quais
seria muito mais difícil
concluir esta dissertação

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Adroaldo Raizer, pela presença constante e clara idéia de onde chegar.

Aos professores Nelson Sadowski, J. P. Assumpção Bastos e Walter Carpes Júnior.

A todos meus colegas do GRUCAD pelo clima caloroso e pelas dicas imprescindíveis do funcionamento destas máquinas infernais que são os computadores e acessórios.

Ao Wilson, da Coordenadoria de Pós-Graduação.

À minha família, pelo incentivo para chegar onde estou.

À Nadir Doubek pelas importantes dicas que me deu ao longo de nossa caminhada juntos.

Ao CNPQ pela concessão da bolsa.

Resumo

Neste trabalho são apresentados a formulação matemática de dois métodos para se calcular o campo elétrico gerado por linhas de transmissão em 2D: o método de simulação de cargas e o método de elementos finitos utilizando o potencial escalar elétrico complexo. O potencial escalar elétrico complexo possibilita a representação completa do campo elétrico gerado por linhas de transmissão, que pode ser representado sob a forma complexa. São apresentados resultados de campo elétrico calculados pelos dois métodos, comparando-os com valores medidos.

Há uma revisão bibliográfica dos efeitos dos campos elétricos e magnéticos sobre o organismo humano e alguns dos mecanismos de interação entre ambos, entre eles a formulação para o cálculo de corrente induzida num modelo humano para casos bidimensionais e axissimétricos.

São apresentados resultados de campo elétrico e densidades de corrente elétrica obtidas na literatura e calculados pelo EFCAD em um modelo humano.

Abstract

This work presents a mathematical formulation of two calculation 2D methods for transmission line electric field : the charge simulation method and finite element method using the complex scalar electric potential. The complex scalar electric potential allows the whole representation of electric field created by a transmission line, using a complex formulation. Results of calculation of electric field for two methods are presented. They are compared with measured values.

There is a bibliography revision of the electric and magnetic fields effects on the human body and interactions between both. The formulation for calculating induced currents inside a human model for axisymmetric and bidimensional are presented. Results of the electric field and current density distribution calculated by EFCAD and from the bibliography are presented.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	01
PRIMEIRA PARTE - O CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO EM 2D	03
CAPÍTULO 2 - CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO EM 2D	04
1.1. Introdução	04
1.2. Características do campo elétrico	04
1.3. Cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão através do método de cargas equivalentes	07
1.3.1. Determinação das cargas equivalentes do condutor	08
1.3.2. Cálculo do campo elétrico produzido pelas cargas equivalentes	12
1.3.3. Exemplo de cálculo de campo elétrico por uma LT com duas tensões de alimentação através do MSC	13
1.4. Cálculo do campo elétrico gerado por LT's através do método de Galerkin aplicado ao método de elementos finitos	16
1.4.1. Equações fundamentais	16
1.4.2. Formulação do problema do cálculo do campo elétrico gerado por Linhas de Transmissão	18
1.4.3. Resolução Numérica	22
1.4.3.1. A forma fraca	22

1.4.3.2. O método de Galerkin	23
1.4.3.3. O método de elementos finitos	24
1.4.4. Formulação do campo elétrico em 2D e axissimétrico através do MEF	29
1.5. Conclusão	31
CAPÍTULO 2 - APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE CAMPO ELÉTRICO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	32
2.1. Introdução	32
2.2. Domínio de análise	32
2.3 Aspectos computacionais do método de elementos finitos	33
2.3.1. Módulos para o cálculo do campo elétrico através do MEF	34
2.4. Linha de transmissão trifásica de Colbún-Alto Jahuel da ENDESA no Chile (Ortiz e Portela, 1992)	36
2.4.1. Domínio de análise	37
2.4.2. Malha para o domínio da LT de 500 kV de Colbún-alto Jahuel	38
2.4.3. Curvas equipotenciais	39
2.4.4. Curvas de campo elétrico fornecidas pelo MSC, MEF e valores medidos	39
2.5. Linha de transmissão trifásica experimental de 1050 KV do projeto UHV em Pittsfield, Massachussets (Deno, 1976)	41
2.5.1. Domínio de análise para linha experimental de 1050 kV do projeto UHV	42
2.5.2. Malha de elementos finitos para a linha de 1050 kV	43
2.5.3. Linhas equipotenciais para a linha de 1050 kV	44
2.5.4. Curvas de campo elétrico	45

2.6. Conclusão	46
SEGUNDA PARTE - EFEITOS DOS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS SOBRE OS SERES VIVOS	47a
CAPÍTULO 3 - O EFEITO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS SOBRE SERES HUMANOS	48
3.1. Introdução	48
3.2. Delimitação do problema de campos eletromagnéticos sobre o organismo humano	48
3.3. Classificação dos efeitos de curta duração sobre seres humanos a partir de acoplamentos de campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão	51
3.3.1. Classificação das reações a passagem de corrente elétrica em seres humanos	51
3.3.2. Reações a passagem de corrente produzida por contato direto	52
3.3.2.1. Percepção	54
3.3.2.2. Libertação	55
3.3.2.3. Parada cardíaca	55
3.3.2.4. Fibrilação ventricular	56
3.3.3. Reação ao faiscamento	58
3.3.4. Percepção direta do campo elétrico	60
3.3.5. Percepção direta do campo magnético	60
3.4. Efeitos de longa duração de acoplamentos elétricos e magnéticos sobre seres humanos devido a linhas de transmissão	61
3.4.1. Mecanismos básicos de interação entre campos elétricos e magnéticos e organismos vivos	61

3.4.1.1. Correntes elétricas geradas pela variação da indução magnética	61
3.4.1.2. Correntes elétricas induzidas por campos elétricos	63
3.4.1.3. Movimento de ímãs permanentes	64
3.4.1.4. Forças de Lorentz	65
3.4.2. Fontes de campos magnéticos	65
3.4.3. Efeitos biológicos de campos elétricos e magnéticos de extrema baixa frequência	67
3.4.3.1. Associação com o câncer	67
3.4.3.2. Alterações no ritmo circadiano	69
3.4.3.4. Estudo em células e órgãos	70
3.5. Conclusões sobre os efeitos dos campos elétricos e magnéticos sobre o organismo humano	71
3.5.1. Efeitos sensíveis a pessoas pela passagem de corrente elétrica ou por contato direto ou induzida	71
3.5.2. Efeitos sobre o organismo humano dos campos ELF devido a exposições prolongadas	72
CAPÍTULO 4 - DENSIDADE DE CORRENTE INDUZIDA NO CORPO HUMANO	74
4.1. Introdução	74
4.2. A distribuição de campo elétrico e a densidade de corrente num modelo humano	74
4.2.1. Modelo humano	75
4.2.2. Formulação para o cálculo da densidade de corrente em coordenadas cartesianas e cilíndricas	76
4.2.3. Domínio de análise axissimétrico	78
4.2.4. Relações entre a distribuição de campo elétrico e a densidade média de corrente com a altura do modelo humano	80
4.2.4.1. Campo elétrico no modelo axissimétrico da literatura	81

4.2.4.2. Campo elétrico no modelo axissimétrico retangular	82
4.2.4.3. Densidade de corrente no modelo axissimétrico da literatura	83
4.2.4.4. Densidade de corrente no modelo 2D axissimétrico retangular	84
4.2.4.5. Distribuição de campo no domínio axissimétrico retangular	84
4.3. Distribuição de campo elétrico e densidade de corrente num modelo humano sob uma linha de 500 kV	85
4.3.1. Um modelo humano sob uma linha de 500 kV	85
4.3.2. Domínio	86
4.3.3. Malha do domínio	87
4.3.4. Curvas equipotenciais	88
4.3.5. Valores de campo elétrico no modelo humano	89
4.3.6. Densidade de correntes no modelo humano	90
4.4. Conclusões	92
Conclusões	93
Referências Bibliográficas	95
APÊNDICE	100
ANEXO A1. Valores limites de campo eletromagnéticos	101
ANEXO A2. - Conceitos de tensão de toque e tensão de passo	102

INTRODUÇÃO

As equações de Maxwell descrevem o comportamento dos campos eletromagnéticos. A resolução da equação adequada para cada problema envolve elaborados recursos e conceitos matemáticos, tais como expansão em série, separação de variáveis, polinômios de Legendre, funções de Bessel, etc. Assim, a análise de dispositivos com geometria complexa é extremamente complicada e laboriosa, exigindo, freqüentemente, considerações simplificadoras que tornem viável a resolução de certos problemas, muito embora empobrecem consideravelmente a qualidade da resposta.

Com o advento dos computadores digitais, várias técnicas numéricas puderam ser utilizadas para o cálculo de campos. Na década de 70, o método de elementos finitos, já usado em problemas de engenharia mecânica, começou a ser aplicado em problemas eletromagnéticos, permitindo que estruturas mais complexas possam ser analisadas.

Além do método de elementos finitos, existem outros quatro principais métodos de cálculo numérico para resolver problemas eletrostáticos: diferenças finitas, Monte Carlo, simulação de cargas e equação integral (Takuma et. al., 1981). Neste trabalho serão apresentadas as formulações matemáticas do método de simulação de cargas (MSC), um método clássico para o cálculo de campos elétricos, e do método de elementos finitos (MEF).

O método de elementos finitos é uma técnica geral de resolução de equações diferenciais com valores de contorno. Basicamente consiste na discretização do domínio de estudo em um número de regiões elementares chamadas elementos finitos, caracterizados por pontos definidos nos vértices ou arestas do elemento, chamados nós. O conjunto de nós ou elementos é conhecido como malha de elementos finitos. A equação diferencial é aproximada, dentro de cada elemento, como uma combinação linear, quadrática, cúbica, etc..., das variáveis da equação definidas em cada nó.

O método de elementos finitos é usado para o cálculo de campos em contadores, motores, dispositivos com peças móveis, correntes de Foucault, etc. A intenção é utilizar o método de elementos finitos para calcular o campo elétrico gerado por linhas de transmissão em 2D.

Em primeiro lugar, precisa-se conhecer a natureza do campo elétrico gerado por linhas de transmissão. O método de simulação de cargas dá a noção do caráter complexo do campo elétrico. Com isto, no método de elementos finitos, necessita-se definir o potencial escalar elétrico complexo e a correspondente formulação matemática, que possibilite sua existência.

No capítulo 1 são apresentadas a formulação para o cálculo do campo elétrico pelo MSC, um exemplo de cálculo de campo elétrico com este método, conceitos básicos do eletromagnetismo, a formulação para se resolver o problema do campo elétrico gerado

por linhas de transmissão, o método de Galerkin, o método de elementos finitos e a formulação para o cálculo do campo elétrico através do MEF para casos bidimensionais e axissimétricos.

No capítulo 2, são apresentados resultados de campo elétrico pelo MSC, MEF e valores medidos, comparando-os entre si para duas linhas de transmissão trifásicas: uma de 500 kV e outra de 1050 kV.

No capítulo 3 é feita uma pequena revisão bibliográfica dos efeitos sobre o organismo humano de campos elétricos e magnéticos de extrema baixa frequência, em torno de 60 Hz, a curta e longa exposição. São apresentadas algumas conclusões sobre os possíveis efeitos nocivos dos campos.

No capítulo 4 são mostrados os resultados de campo elétrico e densidade de corrente induzidas eletricamente em um modelo humano calculado em nosso trabalho axissimétrico retangular e comparados com valores para um modelo, com simetria axial, fornecidos na literatura (Chiba et. al., 1984). Também é apresentada o campo elétrico e densidade de correntes internas para um modelo humano bidimensional sob uma linha de 500 kV.

A dissertação é separada em duas partes: a primeira é composta pelos capítulos 1 e 2 relativo ao cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão e a segunda pelos capítulos 3 e 4 sobre alguns dos efeitos dos campos elétricos e magnéticos sobre seres vivos e o cálculo da corrente induzida eletricamente nestes.

PRIMEIRA PARTE -

O CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO EM 2D

CAPÍTULO 1 - CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO EM 2D

1.1. Introdução

Na literatura pode-se encontrar vários métodos para o cálculo de campos elétricos. Entre os métodos numéricos citam-se (Takuma et. al., 1981): diferenças finitas, elementos finitos, simulação de cargas, Monte Carlo e equação integral, entre outros. Observa-se também que o método de simulação de cargas é o mais freqüentemente usado. Neste capítulo serão introduzidas as características do campo elétrico e estudado e implementado o método de simulação de cargas, como também o método de elementos finitos, utilizando o potencial escalar elétrico complexo para 2D. Para o método de elementos finitos, será apresentada, também, a formulação matemática para o campo elétrico em problemas axissimétricos.

1.2. Características do campo elétrico

Para cada tipo de linha de transmissão, DC ou alternada (monofásica, trifásica e outras), o campo elétrico possui diferentes características. Para uma linha DC, o campo elétrico é um vetor e é constante em cada posição no espaço (Deno, 1976). Para uma linha monofásica, com tensão alternada, o vetor em um ponto altera sua direção conforme a tensão da linha é alterada. Para uma linha trifásica, o vetor campo elétrico apresenta uma rotação em praticamente todo espaço, exceto nas superfícies da condição de contorno, tais como o plano do chão na Terra. Como a tensão é sinusoidal e pode ser representada por números complexos, para campos deste tipo, o campo resultante se desdobra em duas partes, uma sendo a parte real e a outra, a parte imaginária, com componentes no eixo horizontal, x , e no eixo vertical, y . As componentes no eixo x , referentes a cada uma das fases, ao se somarem, geralmente se cancelam e são menos de 10% do valor da componente no eixo y (Deno, 1976).

A figura 1.1 mostra a descrição do campo elétrico, linha cheia, variando no tempo em um ponto no espaço da figura 1.2 (Deno, 1976). No ponto haverá um potencial espacial. O potencial neste ponto é um fasor, com uma parte real e outra imaginária, de modo que pode ser representado por uma magnitude e ângulo. O campo elétrico é mais difícil de descrever quando é um vetor fasorial, pois são necessários quatro parâmetros para descrever os dois vetores fasoriais dimensionais. O campo elétrico pode ser descrito de três modos:

1) O campo elétrico tem componentes na direção espacial vertical e horizontal, e em cada direção, uma parte real e outra imaginária ou uma magnitude e ângulo temporal, tal como:

$$\dot{E} = (E_{xr} + jE_{xi})\vec{i} + (E_{yr} + jE_{yi})\vec{j} \quad (1.1a)$$

2) O campo elétrico tem uma parte real com um vetor com magnitude e ângulo em direção espacial e uma parte imaginária com um vetor com magnitude e ângulo em direção espacial .

$$\dot{E} = (E_{xr}\vec{i} + E_{yr}\vec{j}) + j(E_{xi}\vec{i} + E_{yi}\vec{j}) \quad (1.1b)$$

onde

E_{xr} - Parcela real da componente horizontal, em x, do campo elétrico;

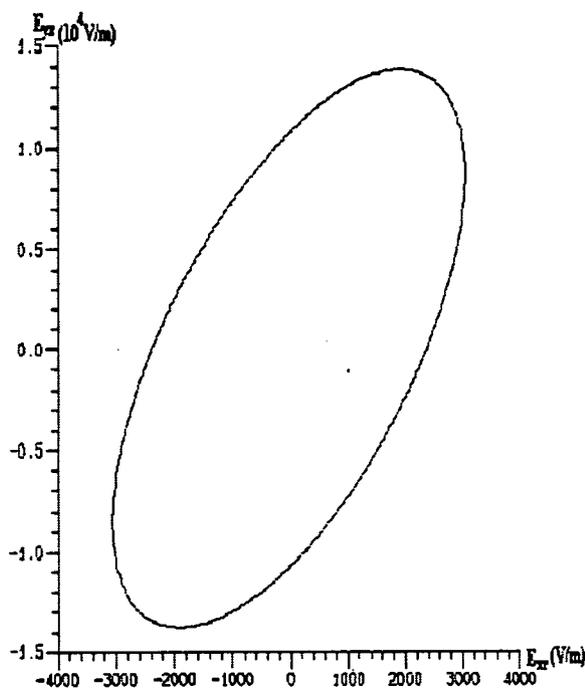
E_{xi} -Parcela imaginária da componente horizontal, em x, do campo elétrico;

E_{yr} - Parcela real da componente vertical, em y, do campo elétrico;

E_{yi} - Parcela imaginária da componente vertical, em y, do campo elétrico.

3) Uma descrição usual, apesar de não completa, é a do vetor campo elétrico como uma elipse, a qual é definida pela magnitude de seu eixo maior e ângulo direcional, e a magnitude do eixo menor.

A figura 1.1 traz o gráfico da parte real da componente vertical pela parte real da componente horizontal. As anotações ao lado da figura 1.1 descrevem o comportamento do campo, detalhados por suas três representações apresentadas acima, no instante em que as fases estão a -120° , 0° e 120° (Deno, 1976).



Campo elétrico em:
 +15.24 m horizontal
 7.62 m vertical

Componentes dos potenciais
 -23.7 real kV
 75.2 imaginário kV
 78.9 $\angle 107.5^\circ$

Campo horizontal
 2.94 real kV/m
 -0.808 imaginário kV/m
 3.05 $\angle -15.4^\circ$ kV/m

Campo vertical
 5.48 real kV/m
 -12.6 imaginário kV/m
 13.7 $\angle -66.5^\circ$ kV/m

Parte real do vetor
 6.22 $\angle 11.08 \text{ rad}$ kV/m

Parte imaginária do vetor
 12.6 $\angle -1.63 \text{ rad}$ kV/m

Eixo maior da elipse
 13.9 $\angle 1.43 \text{ rad}$ kV/m

eixo menor da elipse
 2.35 $\angle -1.42 \text{ rad}$ kV/m

Figura 1.1 Descrição do campo elétrico em um ponto no espaço da figura 1.2, com coordenadas 15.24 m e 7.62 m, com a variação do tempo, representando as partes reais da componente vertical pela horizontal.

Na figura 1.1 E_y é a parte real da componente espacial vertical e E_x é a parte real da componente espacial horizontal.

O mais prático é descrever o campo elétrico próximo ao solo do mesmo modo como ele seria medido. Ele é medido comumente como a intensidade da componente vertical, que é a projeção do vetor campo elétrico sobre o eixo vertical da elipse.

A figura 1.2 mostra a secção transversal de uma linha de transmissão de 765 kV. Nesta secção transversal um número de vetores campo elétrico, em forma de elipse, são mostrados para dar uma perspectiva do que ocorre em cada ponto do espaço. Também na secção transversal está o campo elétrico a 1 e 3 m do solo. Para todas as finalidades práticas, a magnitude do eixo maior que representa o campo elétrico e a componente vertical do campo elétrico são iguais. Também são mostrados linhas equipotenciais espaciais para 200,

100, 50, 25 e 12.5 kV. São mostrados a posição do feixe de condutores das três fases e dos cabos pára-raios.

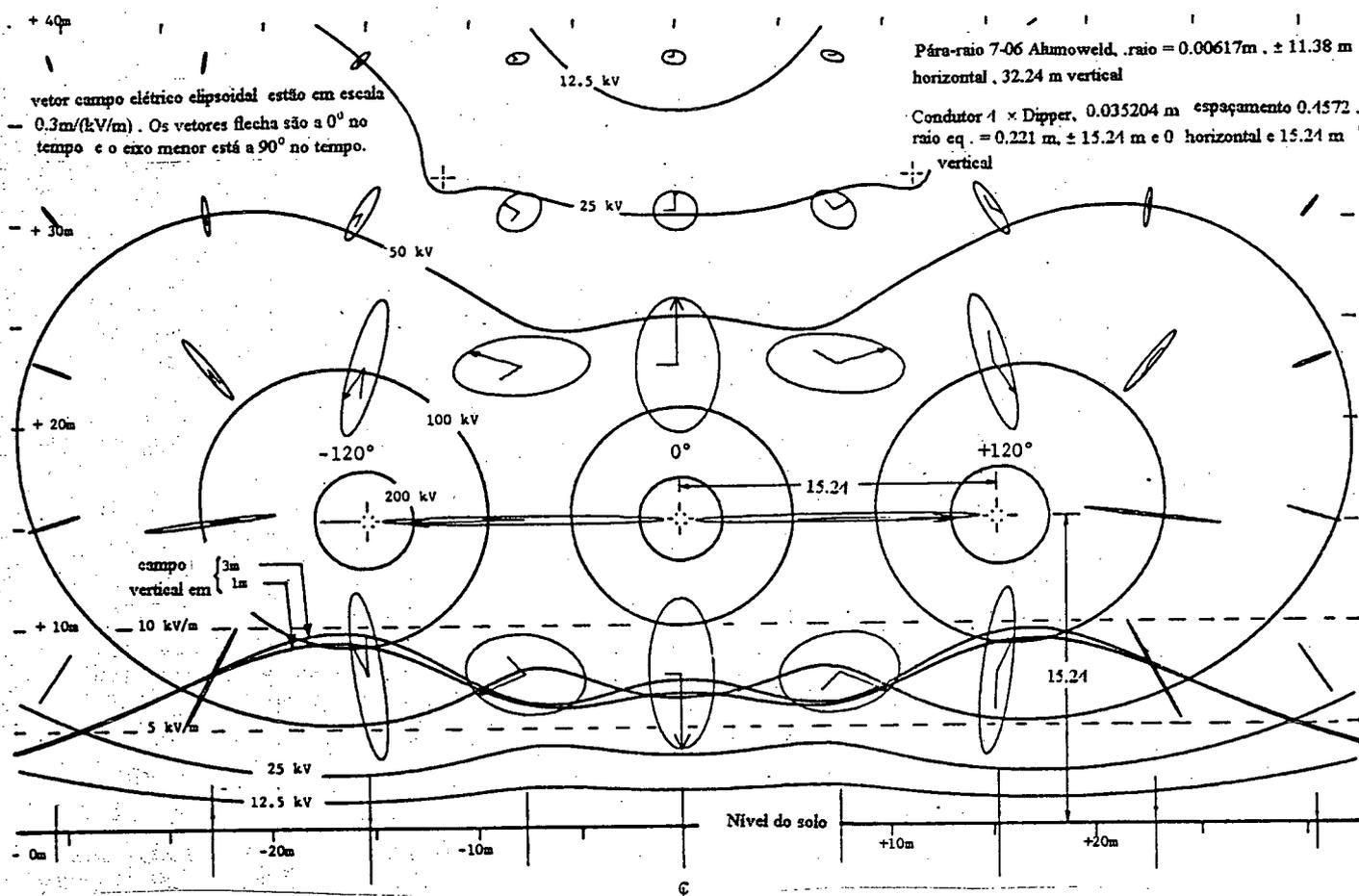


Figura 1.2 Linha de 765 kV a uma altura de 15.24 m: mapa de potenciais espaciais, vetor campo elétrico em forma de elipse e a amplitude do campo elétrico a altura de 1 e 3 m. (Deno, 1976).

1.3. Cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão através do método das cargas equivalentes

No método de simulação de cargas, para uma linha de transmissão, o potencial elétrico complexo instantâneo de cada fase é convertido em cargas elétricas fictícias equivalentes para respectiva fase. As cargas são obtidas através da multiplicação da matriz de capacitâncias próprias e mútuas das fases da linha e cabos pára-raios pela matriz de

potenciais. Estas cargas representam as cargas de um condutor cilíndrico de comprimento infinito que gere o mesmo campo que os cabos reais. E com as cargas calculadas, o campo elétrico é obtido pela resolução do teorema de Gauss para um cilindro de comprimento infinito.

O método de cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão através de cargas equivalentes (Singer et al., 1974; Beasley et al., 1979; Takuma, Kawamoto e Fujinami, 1981; IESA, 1987; Camargo, 1990) consiste basicamente de dois estágios:

- 1) Cálculo da carga equivalente por unidade de comprimento do condutor;
- 2) Cálculo do campo elétrico produzido por estas cargas.

Para o caso do cálculo do campo elétrico em duas dimensões algumas simplificações são necessárias :

- As cargas são uniformemente distribuídas em um cabo (isto implica em admitir cabos homogêneos, de superfície lisa, comprimento infinito e sem influência de objetos próximos);
- A superfície do solo é plana e equipotencial (potencial nulo);
- As torres não distorcem o campo elétrico.

1.3.1. Determinação das cargas equivalentes do condutor

Os potenciais entre as fases e a terra podem ser representados como cargas equivalentes distribuídas uniformemente nos condutores das fases. Para converter os potenciais em cargas, precisa-se conhecer a teoria das imagens para calcular as capacitâncias próprias e mútuas da linha (Fuchs, 1977).

O solo é um condutor elétrico ideal, $\sigma = \infty$. Os condutores de transmissão aérea se encontram a uma altura h do solo e deste isolado. Suas cargas elétricas são influenciadas pela proximidade do solo. Se o condutor possui uma carga q , há no solo uma carga $-q$ distribuída. A carga $-q$, no solo, pode ser concentrada num condutor cilíndrico a uma altura $-h$ da superfície do solo. Este condutor é uma imagem especular do condutor aéreo. Com os condutores das fases e suas imagens pode-se calcular as capacitâncias próprias e mútuas da linha. Para isto, é necessário calcular os coeficientes de potencial, reuni-los matricialmente e depois inverter esta matriz.

A seguir apresentar-se-á a formulação matemática para o cálculo das cargas equivalentes de cada condutor das fases e cabos pára-raios, a partir de (IESA. 1987)

As cargas do condutor de uma linha de múltiplos condutores pode ser representada pela seguinte equação matricial :

$$[\dot{Q}] = [C][\dot{V}] \quad (1.1)$$

onde

$$[\dot{Q}] = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \cdot \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} - \text{Matriz das cargas complexas (C.m}^{-1} \text{);}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdot & C_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & \cdot & C_{nn} \end{bmatrix} - \text{Matriz quadrada dos coeficientes pr\u00f3prios e m\u00fatuos das}$$

capac\u00eancias da linha - coeficientes de potencial (C.(V.m)⁻¹);

$$[\dot{V}] = \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \cdot \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} - \text{Matriz das tens\u00f5es complexas, composta pelas tens\u00f5es nos condutores,}$$

(V).

onde

n - \u00e9 o n\u00famero de fases somado com o n\u00famero de cabos para-raios.

Para determinar a matriz $[C]$, s\u00e3o inicialmente calculados os coeficientes de potencial da linha pelas express\u00f5es abaixo. Ver figura 1.3. (IESA, 1987; Camargo, 1990).

$$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ (F.m}^{-1}\text{)} \quad (\text{permissividade el\u00e9trica do v\u00e1cuo}) \quad (1.2)$$

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (1.3)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \quad (1.4)$$

e

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ji} \quad (1.5)$$

onde

λ_{ii} - Coeficiente de potencial próprio relativo ao potencial do condutor i gerado por sua carga ($m.F^{-1}$);

λ_{ij} - Coeficiente de potencial mútuo relativo ao potencial no condutor i gerado pelo condutor j ($m.F^{-1}$);

h_i - Altura do condutor (m);

D'_{ij} - Distância entre o condutor i e a imagem do condutor j , j' (m);

D_{ij} - Distância entre o condutor i e o condutor j (m);

r_i - Raio do condutor i (m).

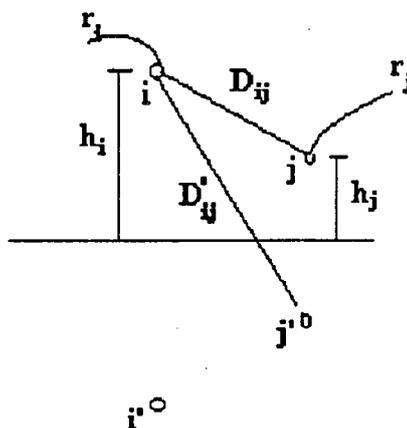


Figura 1.3 Diagrama para o cálculo dos coeficientes de potencial

Invertendo a matriz $[\lambda]$, obtêm-se a matriz $[C]$ conforme a expressão abaixo:

$$[C] = [\lambda]^{-1} \quad (1.6)$$

e finalmente, para calcular-se as cargas tem-se:

$$[Q] = [C][V]$$

Quando as fases de uma linha de transmissão possuem um condutor com múltiplos subcondutores, dispostos uniformemente sobre um círculo de raio R , como visto na figura

1.4 com um condutor com quatro subcondutores, um condutor equivalente pode ser adotado com um raio equivalente r_{eq} (Camargo, 1990). O r_{eq} pode ser interpretado como o raio de um condutor cilíndrico fictício que possuindo a mesma carga q , produz o mesmo campo elétrico que o condutor múltiplo (Fuchs, 1977).

$$r_{eq} = \sqrt[m]{mrR^{m-1}} \quad (1.7)$$

onde:

m - número de subcondutores;

r - raio de um subcondutor;

R - raio geométrico do feixe.

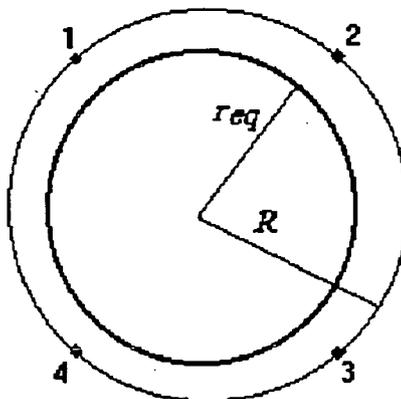


Fig. 1.4 Raio equivalente de um feixe geminado

Com as cargas equivalentes em cada um dos condutores, é possível calcular o campo elétrico utilizando a expressão para calcular o campo elétrico em um condutor de comprimento infinito.

1.3.2. Cálculo do campo elétrico produzido pelas cargas equivalentes

Quando as cargas por unidade de comprimento são determinadas, a intensidade do campo elétrico é calculada pela resolução do teorema de Gauss para um cilindro de comprimento infinito. O campo resultante é o somatório das contribuições de cada condutor e sua imagem.

As coordenadas do condutor a são (x_a, y_a) . As coordenadas do condutor imagem a' são $(x_a, -y_a)$, conforme a figura 1.5, onde é mostrado apenas um condutor.

As componentes fasoriais horizontal, \dot{E}_{xa} , e vertical, \dot{E}_{ya} , da intensidade do campo elétrico em (x, y) gerados pelo condutor a e sua imagem a' , são expressos por:

$$\dot{E}_{xa} = \frac{\dot{q}_a}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{x-x_a}{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2} - \frac{x-x_a}{(x-x_a)^2 + (y+y_a)^2} \right\} \quad (1.8)$$

e

$$\dot{E}_{ya} = \frac{\dot{q}_a}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{y-y_a}{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2} - \frac{y+y_a}{(x-x_a)^2 + (y+y_a)^2} \right\} \quad (1.9)$$

Para n condutores, o campo elétrico será o somatório da contribuição de todos os condutores das fases e cabos pára-raios, se estes forem multiplamente aterrados.

$$\dot{E}_{xa} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \left\{ \frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2} \right\} \quad (1.10)$$

$$\dot{E}_{ya} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \left\{ \frac{y-y_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \frac{y+y_i}{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2} \right\} \quad (1.11)$$

O campo resultante é:

$$E = \sqrt{\left| \dot{E}_{xt} \right|^2 + \left| \dot{E}_{yt} \right|^2} \quad (1.12)$$

Este valor é o campo elétrico eficaz, pois as tensões das fases são eficazes. Este valor de campo é o máximo valor de campo no ponto considerado. Este valor independe do ângulo da fase, sendo constante ao longo do tempo (Deno, 1976).

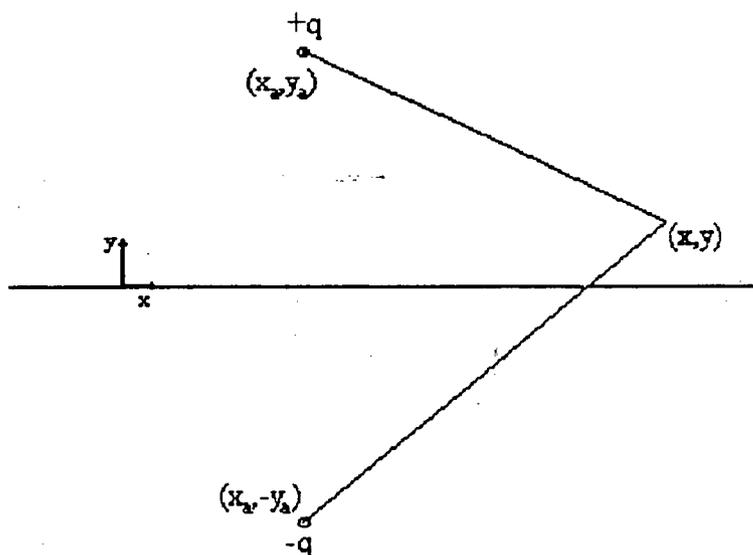


Figura 1.5 Disposição geométrica do condutor

Para exemplificação do método, se apresentará o cálculo de uma linha fictícia com duas tensões de alimentação.

1.3.3. Exemplo de cálculo de campo elétrico gerado por uma linha de transmissão com duas tensões de alimentação através do MSC

Considere-se uma linha com duas fases, sem cabos pára-raios. Cada fase é um arranjo geminado com quatro subcondutores, distanciados entre si de 45 cm e com raio de 1.257cm, como mostra a figura 1.5a. A distância entre as fases, visto na horizontal é de 10 m. A altura média dos subcondutores da fase A é 5 m e da fase B, 10 m. Calcular-se-á o campo elétrico resultante no ponto (10,1) no referencial Oxy, considerando o ponto de referência das coordenadas no solo, sob a fase A.

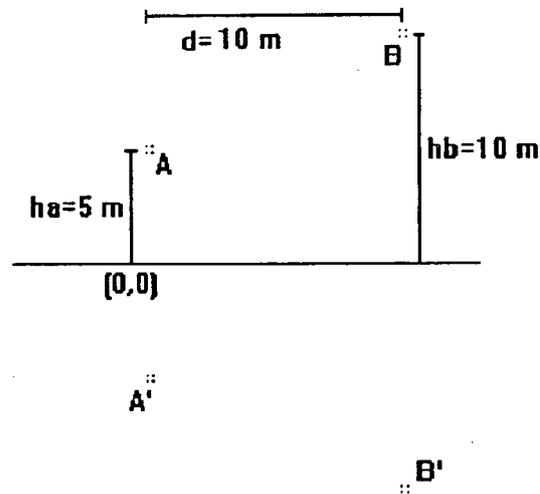


Figura 1.5a Disposição geométrica de uma linha de transmissão com duas tensões de alimentação consideradas.

Na Figura 1.5a

A e A' são os condutores da fase e imagem da fase A e o mesmo vale para fase B.

Inicialmente se calcula o raio equivalente do arranjo geminado de acordo com a expressão (1.7) e substituindo seus valores

$$r_{eq} = \sqrt[4]{4 * 0.01257 * \left(.45 * \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^3} = 0.2006 \text{ m}$$

Com as expressões (1.3) e (1.4) calcula-se os potenciais próprios e mútuos:

$$\lambda_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2 * 5}{0.2006} = \frac{3.908933}{2\pi\epsilon_0}$$

$$\lambda_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2 * 10}{0.2006} = \frac{4.602080}{2\pi\epsilon_0}$$

$$\lambda_{12} = \lambda_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{18.027756}{11.180340} = \frac{.477756}{2\pi\epsilon_0}$$

A matriz de capacitâncias próprias e mútuas será:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 3.908933 & 0.477756 \\ 0.477756 & 4.602080 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$C = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 0.259106 & -2.689795 * 10^{-2} \\ -2.689795 * 10^{-2} & 0.220088 \end{bmatrix}$$

Considerando-se as tensões como

$$\dot{V}_A = V_{\max} (\cos \omega t + j \operatorname{sen} \omega t)$$

$$\dot{V}_B = V_{\max} \left(\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + j \operatorname{sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right)$$

Para $V_{\max} = 500 \text{ kV}$ e $\omega t = 0 \text{ rad}$

$$V_A = 500 \text{ kV}$$

$$V_B = (-250 + j433,013) \text{ kV}$$

e a matriz de cargas será:

$$\dot{Q} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 0.259106 & -2.689796 * 10^{-2} \\ -2.689796 * 10^{-2} & 0.220088 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 500 \text{ kV} \\ (-250 + j433,013) \text{ kV} \end{bmatrix}$$

Assim,

$$\dot{q}_1 = 2\pi\epsilon_0 (136277 - j11647) \text{ C}$$

$$\dot{q}_2 = 2\pi\epsilon_0 (-68470 + j95470) \text{ C}$$

Aplicando estas cargas nas equações (1.8) e (1.9)

$$\dot{E}_{xa} = \frac{2\pi\epsilon_0 * (136277 - j11647)}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{10-0}{(10-0)^2 + (1-5)^2} - \frac{10-0}{(10-0)^2 + (1+5)^2} \right\} = 1728 - j148 \text{ (V.m}^{-1}\text{)}$$

$$\dot{E}_{ya} = \frac{2\pi\epsilon_0 * (136277 - j11647)}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1-5}{(10-0)^2 + (1-5)^2} - \frac{1+5}{(10-0)^2 + (1+5)^2} \right\} = -10711 + j915 \text{ (V.m}^{-1}\text{)}$$

$$\dot{E}_{xb} = \frac{2\pi\epsilon_0 * (-68470 + j95301)}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{10-10}{(10-10)^2 + (1-10)^2} - \frac{10-10}{(10-10)^2 + (1+10)^2} \right\} = 0 \text{ (V.m}^{-1}\text{)}$$

$$\dot{E}_{yb} = \frac{2\pi\epsilon_0 * (-68470 + j95301)}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1-10}{(10-10)^2 + (1-10)^2} - \frac{1+10}{(10-10)^2 + (1+10)^2} \right\} = 13832 - j19253 \text{ (V.m}^{-1}\text{)}$$

Aplicando as equações (1.10), (1.11) e (1.12), o campo elétrico total será:

$$\dot{E}_{xt} = \dot{E}_{xa} + \dot{E}_{xb} = 1728 - j148 \text{ (V.m}^{-1}\text{)}$$

$$\dot{E}_{yt} = \dot{E}_{ya} + \dot{E}_{yb} = 3121 - j18332 \text{ (V.m}^{-1}\text{)}$$

$$E = \sqrt{1728^2 + 148^2 + 3121^2 + 18328^2} = 18682 \text{ (V.m}^{-1}\text{)}$$

Este é o valor de campo elétrico para a tensão de alimentação considerada num determinado tempo, não necessariamente o valor máximo de campo. O campo resultante, para este caso de linha, variará conforme a variação de ωt . A linha teria de ser trifásica balanceada para que o campo resultante fosse máximo.

Um outro método de cálculo que será abordado neste trabalho é o de elementos finitos, que será apresentado a seguir.

1.4. Cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão através do método de Galerkin aplicado ao método de elementos finitos.

Neste item serão apresentadas as equações fundamentais do eletromagnetismo e suas relações constitutivas, com o intuito de se obter a equação do problema do campo elétrico gerado por linhas de transmissão, que será resolvida numericamente através do método de elementos finitos, o método mais flexível na solução de campos elétricos e magnéticos de dispositivos eletromagnéticos (Beasley et. al, 1979).

1.4.1. Equações fundamentais

As equações fundamentais do eletromagnetismo são as equações de Maxwell (Bastos, 1992):

$$\text{rot}\vec{E} + \frac{\partial\vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (1.13)$$

$$\text{rot}\vec{H} - \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (1.14)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (1.15)$$

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (1.16)$$

onde

\vec{E} - campo elétrico ($V.m^{-1}$)

\vec{B} - indução magnética (T);

\vec{H} - campo magnético ($A.m^{-1}$);

\vec{D} - indução elétrica ($C.m^{-2}$);

\vec{J} - densidade de corrente ($A.m^{-2}$);

ρ - densidade volumétrica de carga elétrica ($C.m^{-3}$);

t - tempo (s)

Além destas equações, existem relações adicionais denominadas relações constitutivas, dependentes dos meios onde existe o campo:

$$\vec{D} = \|\epsilon\|\vec{E} \quad (1.17)$$

$$\vec{B} = \|\mu\|\vec{H} + \vec{B}_r \quad (1.18)$$

$$\vec{J} = \|\sigma\|\vec{E} \quad (1.19)$$

onde

$\|\epsilon\|$ - Tensor de permissividade elétrica do meio ($F.m^{-1}$);

$\|\mu\|$ - Tensor de permeabilidade magnética do meio ($H.m^{-1}$);

$\|\sigma\|$ - Tensor de condutividade elétrica do meio ($(\Omega.m)^{-1}$);

\vec{B}_r - Indução magnética remanente (T).

A indução magnética remanente é acrescentada para que se possa tratar ímãs permanentes, quando existam no domínio.

No caso de os meios serem isotrópicos, os tensores $\|\epsilon\|$, $\|\mu\|$ e $\|\sigma\|$ são reduzidos aos escalares ϵ , μ e σ .

Desta maneira, as relações constitutivas (1.17), (1.18) e (1.19) tornam-se:

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (1.19a)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \vec{B}_r \quad (1.19b)$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (1.19c)$$

1.4.2. Formulação do problema do cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão

Para se chegar a formulação do problema duas considerações devem ser feitas:

1) O campo elétrico gerado por uma linha de transmissão é um fenômeno eletromagnético quase-estático (Deno, 1976), onde existem meios de alta permissividade elétrica relativa ($\epsilon_r \cong 10^6$) ocorrendo em meios com materiais orgânicos ou em meios onde não haja condutividade elétrica. Deste modo, a simplificação habitual para o caso quase estático (Mesquita, 1990)

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \ll \bar{J}$$

não é verdadeira, de modo que o termo do lado esquerdo desta inequação continua válido na equação (1.14).

2) Partindo da equação (1.13)

$$\text{rot} \bar{E} + \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0$$

e devido a equação (1.15) pode-se supor que

$$B = \text{rot} \bar{A} \tag{1.20}$$

onde \bar{A} é o potencial vetor

e

$$\text{rot}(\text{grad} V) \equiv 0$$

com V , o potencial escalar elétrico.

Com as relações anteriores, pode-se supor a seguinte relação

$$\text{rot}(\bar{E} + \text{grad} V) = \text{rot}\left(-\frac{\partial \bar{A}}{\partial t}\right)$$

Isolando E em função de A e de um potencial escalar elétrico V , tem-se:

$$\bar{E} = -\text{grad} V - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \tag{1.21}$$

Para linhas de transmissão de alta tensão, o potencial escalar é muito mais importante que a variação ao longo do tempo do potencial vetor, que é desprezada (Portela, 1987). Assim, $\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cong 0$, de modo que pode-se definir o campo elétrico como

$$\vec{E} = -gradV \quad (1.22)$$

O conjunto das equações de Maxwell agora pode ser escrito:

$$rot \vec{E} = 0 \quad (1.23)$$

$$rot \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.24)$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (1.25)$$

$$div \vec{D} = \rho \quad (1.26)$$

O potencial escalar elétrico não é suficiente para representar as características totais do campo elétrico gerado por uma linha de transmissão, porque as tensões de alimentação das três fases da linha são complexas. Assim há a necessidade de introduzir o potencial escalar elétrico complexo, definido como

$$\dot{V} = V^* e^{j\omega t} \quad (1.27)$$

onde

$V^* = V e^{j\alpha}$, onde α representa a defasagem de \dot{V} em relação a referência em uma das três fases.

O potencial escalar elétrico complexo em elementos finitos foi usado para calcular o campo elétrico em isoladores com condutividade e permissividade elétricas e isoladores com revestimento resistivo (Anderson, 1977). Foi utilizado, também, para calcular a corrente induzida em pessoas para problemas axissimétricos (Chiba et. al, 1984).

Com a introdução do potencial escalar elétrico complexo as equações (1.22), (1.23), (1.24) e (1.26) devem ser modificadas de modo a refletir a sua existência

$$\vec{E} = grad \dot{V} \quad (1.28)$$

$$rot \vec{E} = 0 \quad (1.29)$$

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (1.30)$$

$$\text{div}\vec{D} = \dot{\rho} \quad (1.31)$$

Partindo-se da equação (1.30) e aplicando-se o div nos dois lados da equação, tem-se:

$$\text{div}(\text{rot}\vec{H}) = \text{div}\left(\vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}\right)$$

O que resulta em

$$\text{div}\left(\vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}\right) = 0 \quad (1.32)$$

Substituindo as relações constitutivas (1.19a), (1.19c) e a equação (1.28) em (1.32)

$$\text{div}\left(\sigma \text{grad}\dot{V} + \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \text{grad}\dot{V})\right) = 0 \quad (1.33)$$

Substituindo (1.27) em (1.33), têm-se:

$$\text{div}\left(\sigma \text{grad}V^* e^{j\omega t} + \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \text{grad}V^* e^{j\omega t})\right) = 0$$

Como $e^{j\omega t}$ não varia com as coordenadas do domínio, ϵ não varia com o tempo, tem-se:

$$\text{div}\left((\sigma + j\omega\epsilon) \text{grad}V^*\right) = 0 \quad (1.34)$$

Que é a equação que descreve o comportamento do potencial escalar elétrico complexo nos pontos do domínio Ω , representado na figura 1.6.

Para se resolver uma equação diferencial de problema de contorno há a necessidade de se estabelecer as condições de fronteira.

As condições de fronteira, Γ , do domínio Ω são de dois tipos (Becker et. al., 1981; Zienkiewicz e Morgan, 1983):

a) Condição de contorno de Dirichlet, onde o potencial é imposto:

$$V = V_0 \quad , \text{ em } \Gamma_1 \quad (1.35)$$

b) Condição de contorno de Neumann:

$$-(\sigma + j\omega\varepsilon) \frac{\partial V^*}{\partial n} = g \quad , \text{ em } \Gamma_2 \quad (1.36)$$

onde

Γ_1 - Parcela de Γ onde se impõem as condições de contorno de Dirichlet;

Γ_2 - Parcela de Γ onde se impõem as condições de contorno de Neumann .

com

$$\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$$

e

$$\Gamma_1 \cap \Gamma_2 = \emptyset$$

De acordo com a maior parte dos casos reais tratados, é utilizado neste trabalho a condição de contorno de Neumann homogênea, isto é:

$$\frac{\partial V^*}{\partial n} = 0 \quad (1.37)$$

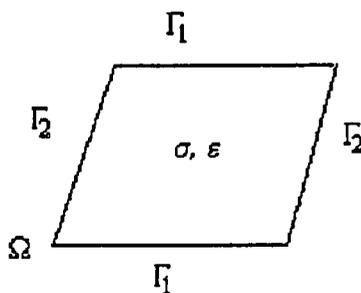


Figura 1.6 Domínio bidimensional Ω com material de permissividade e condutividade elétrica e a representação das condições de contorno.

1.4.3. Resolução Numérica

A equação (1.34) é de difícil resolução analítica, assim, deve-se utilizar alguma técnica numérica para resolvê-la. A técnica numérica é a de elementos finitos.

1.4.3.1. A forma fraca

Para se resolver a equação (1.34), multiplica-a por uma função suficientemente regular chamada função teste u , integrando-a sobre o domínio Ω e faz-se a média resultante igual a zero (Becker et. al., 1981)

$$\int_{\Omega} \text{div}((\sigma + j\omega\epsilon)\text{grad}V^*) u \cdot ds = 0 \quad (1.38)$$

A função teste u é escolhida numa classe de funções teste de modo que $u = 0$ em Γ_1 (Becker et. al., 1981). Assim, aplicando algumas transformações matemáticas, tem-se

$$\int_{\Omega} \text{div}(u(\sigma + j\omega\epsilon)\text{grad}V^*) d\Omega - \int_{\Omega} \text{grad} u(\sigma + j\omega\epsilon)\text{grad}V^* \cdot d\Omega = 0 \quad (1.39)$$

No primeiro termo de (1.39), aplicando o teorema da divergência

$$\int_{\delta\Omega} ((\sigma + j\omega\epsilon)\text{grad}V^*) \cdot \bar{n} u d\Gamma \quad (1.40)$$

Onde $\delta\Omega$ é a fronteira do domínio e \bar{n} é o vetor unitário normal à fronteira. Aplicando a condição de Neumann (1.37) na parcela Γ_2 da fronteira e que $u = 0$ na parcela Γ_1 da fronteira, a equação (1.40) se anula. Deste modo, a forma fraca do problema torna-se:

$$\int_{\Omega} \text{grad} u(\sigma + j\omega\epsilon)\text{grad}V^* d\Omega = 0 \quad (1.41)$$

1.4.3.2. O método de Galerkin

A resposta para o problema consiste em achar a função V^* , para a qual (1.41) é verificada. A função V^* pertence a uma classe de funções admissíveis de dimensão infinita, cuja primeira derivada tenha seu quadrado integrável e $V = \dot{V}_0$ em Γ_1 . A função teste, u , pertence a uma classe de funções de dimensão infinita, H_0 , com sua primeira derivada com quadrado integrável e que se anulam em Γ_1 (Becker et al., 1981; Mesquita, 1990; Vanti, 1992). A função teste u e a solução V^* são linearmente independentes e por pertencerem a classes de funções de dimensão infinita, a procura da solução é extremamente difícil.

Define-se duas classes de funções:

a) Funções admissíveis:

$$H = \{ u : u \in H_1(\Omega); u = V_0 \text{ em } \Gamma_1 \}$$

b) Funções teste

$$H_0 = \{ u : u \in H_1(\Omega); u = 0 \text{ em } \Gamma_1 \}$$

onde $H_1(\Omega)$ é o espaço de Sobolev de 1ª ordem, ou seja, o espaço das funções suficientemente regulares de forma que suas 1ªs derivadas tenham seu quadrado integrável sobre Ω .

O método de Galerkin consiste em procurar uma solução aproximada para (1.41) em uma classe de dimensão finita. Assim, utilizando um número limitado, n , de termos linearmente independentes, obtém-se uma aproximação V_n^* de V^* .

$$V_n^* = \sum_{i=1}^n c_i N_i \quad (1.42)$$

Sendo N_i a "função base" associada ao nó i , c_i são as constantes desconhecidas e n a dimensão do espaço.

1.4.3.3. O método de elementos finitos

O método de Galerkin fornece uma elegante estratégia para construção da solução aproximada para problemas de contorno, porém falha por não ter uma maneira sistemática na construção das funções base N_i , tanto para a função teste u , como para a função solução V_n^* .

Esta situação é muito pior quando o domínio é bi ou tridimensional, com as funções N_i tendo que satisfazer as condições de contorno em regiões complexas. Estas dificuldades podem ser superadas utilizando-se o método de elementos finitos.

Na aplicação do método de elementos finitos, o domínio é dividido em subdomínios denominados elementos finitos, conforme figura 1.7. Em cada elemento são definidos pontos chamados nós ou pontos nodais. Deste modo, as funções base são geradas por funções simples (normalmente polinômios de baixa ordem) definidas elemento por elemento sobre a malha de elementos finitos. Os nós são escolhidos de modo que a função base N_i seja contínua nas fronteiras entre os elementos (Becker et al., 1981; Vanti, 1992).

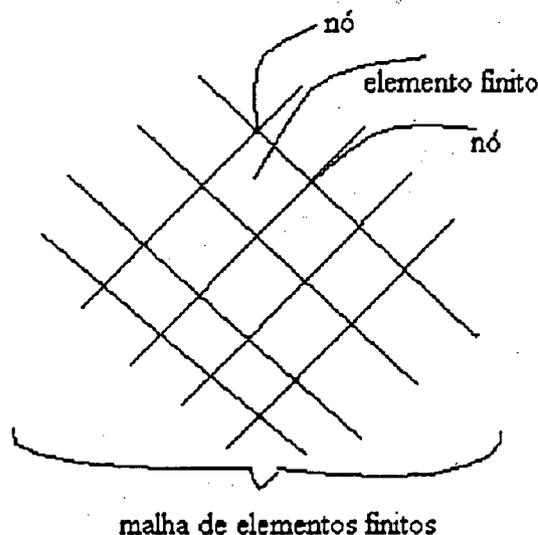


Figura 1.7 Representação da malha de elementos finitos com a definição de elemento e nó.

Neste trabalho é utilizado o elemento bidimensional com funções base lineares obtidos por polinômios de Lagrange.

Para o caso do elemento finito definido na figura 1.8, no qual V_n^* varia no interior do elemento linearmente:

$$\bar{V}^*(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (1.44)$$

Satisfazendo a equação (1.37) nos nós, temos o sistema de equações lineares:

$$V_1^* = a_1 + a_2x_1 + a_3y_1$$

$$V_2^* = a_1 + a_2x_2 + a_3y_2$$

$$V_3^* = a_1 + a_2x_3 + a_3y_3$$

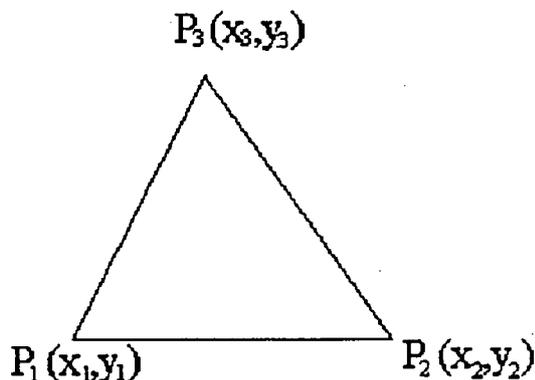


Figura 1.8 Elemento finito triangular com três nós (elemento linear)

Resolvendo os sistemas para a_1 , a_2 e a_3 e substituindo os coeficientes em (1.44), tem-se:

$$\bar{V}^*(x, y) = N_1V_1^* + N_2V_2^* + N_3V_3^* \quad (1.45)$$

onde

$$N_1 = \frac{1}{D}[(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (1.45a)$$

$$(N_1 = \frac{1}{D}[p_1 + q_1x + r_1y])$$

$$N_2 = \frac{1}{D}[(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (1.45b)$$

$$(N_2 = \frac{1}{D}[p_2 + q_2x + r_2y])$$

$$N_3 = \frac{1}{D}[(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (1.45c)$$

$$(N_3 = \frac{1}{D}[p_3 + q_3x + r_3y])$$

onde

D- é o dobro da área do elemento;

$N_i = 1$, quando o ponto considerado é o i ;
 $N_i = 0$, para qualquer nó considerado diferente de i .

Ou escrevendo $\bar{V}^*(x, y)$ de outro modo

$$\bar{V}^*(x, y) = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^3 (p_i + q_i x + r_i y) V_i^* \quad (1.46)$$

A aproximação de (1.41) por elementos finitos torna-se

$$\int_{\Omega} \text{grad} u (\sigma + j\omega\epsilon) \text{grad} \bar{V}^* d\Omega = 0 \quad (1.47)$$

Onde \bar{V}^* é a solução aproximada de \bar{V}_n^* dada por:

$$\bar{V}^* = \sum_{i=1}^{nno} N_i V_i^* \quad (1.48)$$

sendo nno o número total de nós da malha e V_i^* o valor de \bar{V}^* no nó i
 Substituindo (1.48) em (1.47)

$$\int_{\Omega} (\sigma + j\omega\epsilon) \sum_{i=1}^{nno} (\text{grad} N_i) V_i^* \text{grad} u d\Omega = 0 \quad (1.49)$$

Dispõe-se de nno funções teste u_j independentes, de modo que é possível construir um sistema de nno equações com nno incógnitas.

As funções base N_j , sendo independentes, escolhe-se como função teste $u_j = N_j$. Substituindo-se as funções teste por funções base interpoladas, a equação final fica sendo:

$$\sum_{i=1}^{nno} \left[\int_{\Omega} [\text{grad} N_i (\sigma + j\omega\epsilon) \text{grad} N_j] d\Omega \right] [V_j^*] = 0 \quad i=1 \text{ a } nno \quad (1.50)$$

que representado na forma matricial transforma-se:

$$\sum_{j=1}^{nno} S_{ij} V_j^* = 0 \quad i=1, nno$$

Somente os termos em que os índices i e j correspondem a dois nós de um mesmo elemento são não nulos. Este sistema será, então, muito esparso. Nota-se, também, que este sistema é simétrico.

Os coeficientes da matriz são:

$$S_{ij} = (\sigma + j\omega\epsilon) \int_{\Omega} [(grad N_i)^T (grad N_j)] d\Omega \quad (1.51)$$

Para um elemento em 2D

$$S_{ij} = (\sigma + j\omega\epsilon) \int_S [(grad N_i)^T (grad N_j)] ds \quad (1.53)$$

onde S é a área do elemento

Para um elemento pertencente a um corte num domínio com simetria axial (Bastos, 1992)

$$S_{ij} = 2\pi r_0 (\sigma + j\omega\epsilon) \int_S [(grad N_i)^T (grad N_j)] ds \quad (1.53a)$$

De acordo com a figura 1.9, r_0 é a distância do baricentro do elemento k ao eixo de rotação Oz

$$r_0 = (r_1 + r_2 + r_3) / 3 \quad (1.53b)$$

Onde r_1 , r_2 e r_3 são as distâncias dos três nós do elemento k ao eixo Oz .

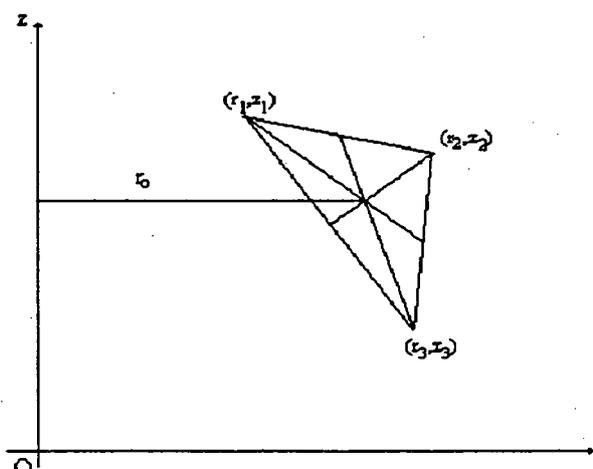


Figura 1.9 Elemento em coordenadas cilíndricas

como

$$\mathit{grad}N = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1.54)$$

Partindo das relações (1.45a), (1.45b) e (1.45c)

$$\mathit{grad}N_1 = \frac{1}{D}(q_1\bar{i} + r_1\bar{j})$$

$$\mathit{grad}N_2 = \frac{1}{D}(q_2\bar{i} + r_2\bar{j})$$

$$\mathit{grad}N_3 = \frac{1}{D}(q_3\bar{i} + r_3\bar{j})$$

e o conjunto representado matricialmente

$$\mathit{grad}N = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{bmatrix} \quad (1.55)$$

Assim, após a transposição de $\mathit{grad}N$ e a integração da superfície do elemento, a equação (1.53) fica:

$$S_{ij} = (\sigma + j\omega\epsilon) \frac{1}{D} \begin{bmatrix} q_1q_1 + r_1r_1 & q_1q_2 + r_1r_2 & q_1q_3 + r_1r_3 \\ q_2q_1 + r_2r_1 & q_2q_2 + r_2r_2 & q_2q_3 + r_2r_3 \\ q_3q_1 + r_3r_1 & q_3q_2 + r_3r_2 & q_3q_3 + r_3r_3 \end{bmatrix} \quad (1.56)$$

E a equação (1.53a), para o caso axissimétrico fica:

$$S_{ij}^a = 2\pi r_0(\sigma + j\omega\epsilon) \frac{1}{D} \begin{bmatrix} q_1q_1 + r_1r_1 & q_1q_2 + r_1r_2 & q_1q_3 + r_1r_3 \\ q_2q_1 + r_2r_1 & q_2q_2 + r_2r_2 & q_2q_3 + r_2r_3 \\ q_3q_1 + r_3r_1 & q_3q_2 + r_3r_2 & q_3q_3 + r_3r_3 \end{bmatrix} \quad (1.56a)$$

Este procedimento deverá ser feito para todos os elementos do domínio de estudo. Estas matrizes locais devem ser condensadas em um sistema matricial global, que resolvido por um método de resolução de sistemas lineares, fornecerá os potenciais complexos nos nós da malha.

1.4.4 Formulação do campo elétrico em 2D e axissimétrica através do MEF

O campo elétrico gerado por uma linha de transmissão alternada pode ser representado como tendo uma parte real e imaginária na direção espacial horizontal e uma parte real e imaginária na direção espacial vertical, ou seja, as componentes direcionais são fasores.

Em coordenadas cartesianas:

$$\vec{E} = \dot{E}_x \vec{i} + \dot{E}_y \vec{j} \quad (1.57)$$

Em coordenadas cilíndricas:

$$\vec{E} = \dot{E}_r \vec{r} + \dot{E}_z \vec{z} \quad (1.57a)$$

E partindo da equação (1.46), substituindo-a em (1.28), teremos as componentes horizontal, \dot{E}_x , e vertical, \dot{E}_y , em cada elemento considerado

$$\dot{E}_x = -\frac{\partial \bar{V}^*(x,y)}{\partial x} = -\frac{1}{D}(q_1 V_1^* + q_2 V_2^* + q_3 V_3^*) \quad (1.58)$$

$$\dot{E}_y = -\frac{\partial \bar{V}^*(x,y)}{\partial y} = -\frac{1}{D}(r_1 V_1^* + r_2 V_2^* + r_3 V_3^*) \quad (1.59)$$

As componentes radial, \dot{E}_r , e no eixo de rotação, \dot{E}_z , são definidas pela troca de índices $x \rightarrow r$ e $y \rightarrow z$, assim:

$$\dot{E}_r = -\frac{\partial \bar{V}^*(r,z)}{\partial r} = -\frac{1}{D}(q_1 V_1^* + q_2 V_2^* + q_3 V_3^*) \quad (1.59a)$$

$$\dot{E}_z = -\frac{\partial \bar{V}^*(r,z)}{\partial z} = -\frac{1}{D}(r_1 V_1^* + r_2 V_2^* + r_3 V_3^*) \quad (1.59b)$$

A formulação do campo elétrico para o caso axissimétrico e cartesianom são a mesma, assim, as componentes real e imaginária das parcelas \dot{E}_x , \dot{E}_y , \dot{E}_r e \dot{E}_z do campo são representadas por:

$$E_{xr} = -\frac{1}{D}(q_1 V_{1r} + q_2 V_{2r} + q_3 V_{3r}) \quad (1.60)$$

$$E_{xi} = -\frac{1}{D}(q_1 V_{1i} + q_2 V_{2i} + q_3 V_{3i}) \quad (1.61)$$

$$E_{yr} = -\frac{1}{D}(r_1 V_{1r} + r_2 V_{2r} + r_3 V_{3r}) \quad (1.62)$$

$$E_{yi} = -\frac{1}{D}(r_1 V_{1i} + r_2 V_{2i} + r_3 V_{3i}) \quad (1.63)$$

$$E_{rr} = -\frac{1}{D}(q_1 V_{1r} + q_2 V_{2r} + q_3 V_{3r}) \quad (1.63a)$$

$$E_{ri} = -\frac{1}{D}(q_1 V_{1i} + q_2 V_{2i} + q_3 V_{3i}) \quad (1.63b)$$

$$E_{zr} = -\frac{1}{D}(r_1 V_{1r} + r_2 V_{2r} + r_3 V_{3r}) \quad (1.63c)$$

$$E_{zi} = -\frac{1}{D}(r_1 V_{1i} + r_2 V_{2i} + r_3 V_{3i}) \quad (1.63d)$$

onde:

E_{*r} - Parte real da componente x ou y cartesiana e r ou z cilíndricas do campo;

E_{*i} - Parte imaginária da componente x ou y cartesiana e r ou z cilíndrica do campo;

V_{*r} - Componente real do potencial;

V_{*i} - Componente imaginária do potencial.

e

$$\dot{E}_x = E_{xr} + jE_{xi} \quad (1.64)$$

$$\dot{E}_y = E_{yr} + jE_{yi} \quad (1.65)$$

$$\dot{E}_r = E_{rr} + jE_{ri} \quad (1.65a)$$

$$\dot{E}_z = E_{zr} + jE_{zi} \quad (1.65b)$$

O campo total é representado por

Em coordenadas cartesianas:

$$|\dot{E}| = \sqrt{|\dot{E}_x|^2 + |\dot{E}_y|^2} \quad (1.66)$$

Em coordenadas cilíndricas:

$$|\dot{E}| = \sqrt{|\dot{E}_r|^2 + |\dot{E}_z|^2} \quad (1.66a)$$

e finalmente

Para coordenadas cartesianas:

$$|\dot{E}| = \sqrt{E_{xr}^2 + E_{xi}^2 + E_{yr}^2 + E_{yi}^2} \quad (1.67)$$

Para coordenadas cilíndricas:

$$|\dot{E}| = \sqrt{E_{rr}^2 + E_{ri}^2 + E_{zr}^2 + E_{zi}^2} \quad (1.68)$$

e se o potencial V^* for o valor eficaz, as eq. (1.67) e (1.68) fornecem o campo elétrico eficaz. O valor das parcelas reais e imaginárias das componentes horizontal e vertical do campo são constantes no elemento considerado.

1.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as características gerais do comportamento de campos elétricos em linhas de transmissão e duas das formulações matemáticas para o cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão: o método de simulação de cargas e o método de elementos finitos

O método de simulação de cargas, um método clássico para o cálculo de campos elétricos, utiliza o conceito de cargas elétricas equivalentes para calcular o campo, enquanto que no método de elementos finitos foi utilizado o potencial escalar elétrico complexo, noção pouco utilizada, mas de grande utilidade como visto neste capítulo, quando existem variação de módulo e fase do potencial.

No próximo capítulo serão apresentados valores de campo elétrico calculados pelo método de elementos finitos e pelo método de simulação de cargas e comparados com valores medidos.

CAPÍTULO 2- APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE CÁLCULO DE CAMPO ELÉTRICO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados resultados de componentes verticais do campo elétrico eficaz calculadas através do método de elementos finitos, método de simulação de cargas e valores medidos, as malhas de elementos finitos utilizadas e curvas de equipotenciais para duas linhas, uma de 500 kV e outra, experimental, de 1050 kV.

2.2. Domínio de análise

O domínio de análise para o estudo de campo elétrico gerado por linhas de transmissão vem de um corte transversal de uma linha, que resulta num perfil lateral como indicado pela figura 2.1, onde são apresentadas os subcondutores das fases de uma linha trifásica, com suas respectivas alturas e distâncias em relação ao eixo de referência, com a origem no solo e sob a fase B, e os cabos pára-raios, com suas alturas e distâncias em relação a origem. O domínio, por ser um perfil lateral é bidimensional.

Do mesmo modo que no método de simulação de cargas, item 1.3.2, algumas considerações são feitas para o cálculo do campo elétrico através do método de elementos finitos:

- 1) A terra é considerada um condutor perfeito, com sua superfície apresentando potencial nulo;
- 2) As torres não distorcem o campo elétrico;
- 3) Da consideração 1), o domínio de análise apresenta condições de contorno de Dirichlet, com potencial nulo representando o solo e condição de contorno de Neumann no restante;
- 4) Os condutores das fases e cabos pára-raios são considerados pontuais, onde são impostos os potenciais para cada fase e potencial nulo para os cabos pára-raios, aqui considerados multiplamente aterrados.

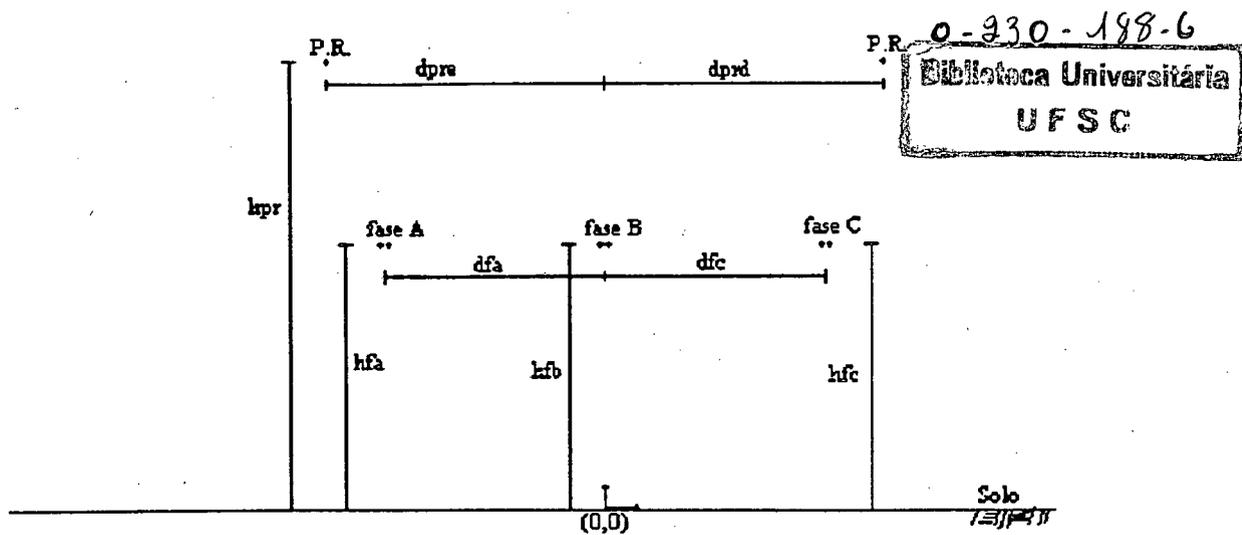


Figura 2.1. Domínio de análise bidimensional de uma linha de transmissão.

A figura 2.1 apresenta a seguinte simbologia:

dfa - Distância horizontal da fase A à origem, no solo sob a fase B;

dfc - Distância horizontal da fase C à origem;

dpre - Distância horizontal do cabo pára-raio esquerdo à origem;

dprd - Distância horizontal do cabo pára-raio direito à origem;

hfa - Altura média dos condutores da fase A;

hfb - Altura média dos condutores da fase B;

hfc - Altura média dos condutores da fase C;

hpr - Altura média dos cabos pára-raios.

Normalmente se considera que a altura do cabo pára-raio esquerdo é a mesma que a do cabo pára-raio direito.

2.3. Aspectos computacionais do método de elementos finitos

Há dois tipos de abordagem computacional para problemas eletromagnéticos : ou se desenvolve programas específicos para calcular um tipo de problema usando o método de elementos finitos, ou se desenvolve um sistema computacional genérico, aplicado a vários casos, que possibilite a aplicação simples e racional do método.

Para tais sistemas usando a filosofia "CAD", com a geometria do dispositivo eletromagnético e suas características constitutivas permite-se o conhecimento de seu funcionamento, e modificações de projeto de modo a torná-lo adequado. Estes sistemas de cálculo permitem a análise eletromagnética da estrutura, tanto da forma qualitativa (visualização de curvas eqüipotenciais) quanto da forma quantitativa (valores de fluxo, de campo).

Para que um sistema funcione dentro da filosofia de CAD é necessário que apresente as seguintes etapas:

a) Pré-processamento : Deve ser fornecida nesta etapa a estrutura a ser analisada (formas geométricas, materiais constitutivos, condições de contorno, etc.). Nesta etapa, a geração da malha deve ser automática ou semi-automática sendo efetuada por um módulo malhador.

b) Processamento : Após a discretização ser realizada, o cálculo utilizando o método de elementos finitos é aplicado, obtendo-se como principal resultado o valor de potenciais incógnitos dos nós da malha.

c) Pós-processamento: Nesta etapa é efetuada uma análise de resultados de forma visual (traçado de equipotenciais, escalas de potenciais, de campos, etc.) ou de forma numérica, onde se obtém valores de fluxos, de campos, de forças, etc...

O EFCAD é um "software" baseado no método de elementos finitos que calcula campos elétricos, magnéticos e térmicos. O programa simula o comportamento de equipamentos elétricos por meio dos campos elétricos e magnéticos por eles gerados, a partir da geometria real do objeto analisado. O programa foi desenvolvido no GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos).

2.3.1. Módulos para o cálculo do campo elétrico através do MEF

Apresentaremos sucintamente, agora, as funções dos módulos responsáveis por cada uma das três etapas anteriormente expostas, para a resolução do problema do campo elétrico em linhas de transmissão. Por ser um sistema computacional genérico, ele permite outros cálculos como, por exemplo, o campo magnético em motores, contadores, correntes de Foucault, peças móveis, etc.

Na etapa de pré-processamento, o domínio é definido conjuntamente com a geração semi-automática da malha através do módulo EFR. Neste módulo além da malha, são definidos os potenciais impostos em pontos representando as tensões das fases, as características elétricas dos materiais que existam no domínio e as condições de contorno de Dirichlet e Neumann. Deve-se ressaltar que os potenciais das fases são pontuais, e impostos em pontos que definem a posição dos condutores das fases.

Na etapa de processamento, são calculados em cada nó da malha, de potencial incógnito, os potenciais escalares elétricos complexos, através do módulo EFCL

Na etapa de pós-processamento são visualizados as linhas equipotenciais com o módulo do potencial complexo, as faixas de potenciais e de campos elétricos, no EFG, e a pesquisa pontual de campo elétrico e os valores das componentes X, Y e módulo do Campo elétrico sobre uma reta no EFN.

Algumas outras características do EFCL devem ser apresentadas:

- Ele calcula os potenciais elétricos complexos para coordenadas cartesianas;
- No EFR há necessidade de se entrar com números inteiros que representem os potenciais impostos de modo a indicar as tensões nas fases ou de uma linha de

transmissão trifásica ou de uma linha de transmissão hexafásica. Os potenciais impostos no EFR são convertidos nas tensões instantâneas das fases de acordo com TABELA 2.1. E estas tensões são os potenciais escalares elétricos complexos. O cálculo do campo se dá para instantes definidos. Apesar do campo elétrico eficaz ser constante, os valores das partes real e imaginária das componentes no eixo horizontal e vertical variam conforme o tempo. Assim, além da tensão da linha, há a necessidade de se considerar qual o argumento ωt_0 das fases.

Os potenciais que devem ser impostos no EFR e o que representam no módulo EFCL são os seguintes, de acordo com a TABELA 2.1:

TABELA 2.1. - Conversão dos potenciais impostos no EFR para potenciais no EFCL

Para uma linha de transmissão trifásica:

POTENCIAL	
EFR	EFCL
1234	$V_{fn} (\cos(\omega t_0 - 120^\circ) + j \text{sen}(\omega t_0 - 120^\circ))$
1235	$V_{fn} (\cos(\omega t_0) + j \text{sen}(\omega t_0))$
1236	$V_{fn} (\cos(\omega t_0 + 120^\circ) + j \text{sen}(\omega t_0 + 120^\circ))$

Para uma linha hexafásica:

POTENCIAL	
EFR	EFCL
1001	$V_{fn} (\cos(\omega t_0) + j \text{sen}(\omega t_0))$
1002	$V_{fn} (\cos(\omega t_0 - 60^\circ) + j \text{sen}(\omega t_0 - 60^\circ))$
1003	$V_{fn} (\cos(\omega t_0 - 120^\circ) + j \text{sen}(\omega t_0 - 120^\circ))$
1004	$V_{fn} (\cos(\omega t_0 - 180^\circ) + j \text{sen}(\omega t_0 - 180^\circ))$
1005	$V_{fn} (\cos(\omega t_0 - 240^\circ) + j \text{sen}(\omega t_0 - 240^\circ))$
1006	$V_{fn} (\cos(\omega t_0 - 300^\circ) + j \text{sen}(\omega t_0 - 300^\circ))$

Onde

V_{fn} - tensão fase-neutro da linha de transmissão. Os valores nominais da linha são de tensões eficazes linha-linha(V);

ω - frequência angular do sistema(rad.s^{-1});

t_0 - Tempo considerado(s);

Como mencionado anteriormente, no item 1.4.4, o campo elétrico eficaz calculado é constante ao longo do tempo, independente do argumento ωt_0 .

2.4. Linha de transmissão trifásica de 500 kV de Colbún-Alto Jahuel da ENDESA no Chile (Ortiz e Portela, 1992)

Para validação do cálculo do campo elétrico eficaz através do MEF serão apresentadas curvas do perfil transversal da componente vertical do campo elétrico obtidas por este método bem como pelo Método de Simulação de Cargas e valores médios medidos para altura de 1 m. A TABELA 2.2 apresenta as características principais da linha de 500 kV de Colbún-Alto Jahuel de ENDESA no Chile e a posição média dos condutores das fases e cabos pára-raios no domínio analisado (Ortiz, Portela, 1992). A seguir é apresentado o domínio de análise.

Com o domínio estabelecido, apresentar-se-á a malha regular gerada pelo MEF. Com a malha, calcula-se os potenciais escalares elétricos complexos no domínio através da montagem da matriz global, condensando os termos S_{ij} (1.56) da matriz de contribuição local. Para caracterizar os potenciais, apresentar-se-á curvas equipotenciais definidas pelo módulo do potencial complexo. E por fim, os valores do campo elétrico calculados pelo MEF, através da expressão (1.67), comparando-os com valores calculados pelo MSC, através da expressão (1.12), e valores medidos.

TABELA 2.2 - Características principais da linha de transmissão de 500 kV de Colbún-Alto Jahuel da ENDESA no Chile (Ortiz e Portela, 1992)

	Fases			cabos pára-raios	
	A	B	C	Direito	Esquerdo
Nº Cond	2	2	2	1	1
Diacond	.03195	.03195	.03195	.01905	.01905
Ditcond	.4	.4	.4	-----	-----
REQ	.0799	.0799	.0799	.01905	.01905
Tensão	$V_{fn} e^{j\omega t}$	$V_{fn} e^{j\omega t - 120^\circ}$	$V_{fn} e^{j\omega t - 240^\circ}$	0	0
Dishorz	-10.8	0	10.8	-13.65	-13.65
Altura	13,00	13,00	13,00	22,00	22,00

Onde:

Nº Cond - Número de condutores por fase ou cabos pára-raios por lado, considerando o centro da linha sobre a fase B;

Diacond - Diâmetro dos condutores das fases e diâmetro dos cabos pára-raios (em metros);

Ditcond - Distância entre condutores de uma mesma fase (em metros);

REQ - Raio de um condutor fictício equivalente, para um conjunto de n condutores de uma fase, que possui a mesma carga e reproduz o mesmo campo elétrico que o condutor múltiplo (em metros);

Tensão - Tensão complexa de cada fase e dos cabos pára-raios, estes considerados multiplamente aterrados (em KV);

Dishorz- Tomando o eixo das abcissas sobre a fase B, a distância horizontal média das outras fases e cabos pára-raios a esta (em metros);

Altura - Distância vertical dos cabos pára-raios e condutores equivalentes das fases ao solo (em metros).

2.4.1. Domínio de análise

A figura 2.2 apresenta um corte transversal no meio do vão entre duas torres desta linha, representando a parcela do domínio com a distribuição espacial dos condutores das fases e cabos pára-raios, onde estes apresentam a menor distância em relação ao solo. Este será o domínio analisado tanto pelo método de elementos finitos quando pelo método de simulação de cargas, do mesmo modo como os valores medidos são para este domínio. O terreno onde se encontra este trecho de linha é plano.

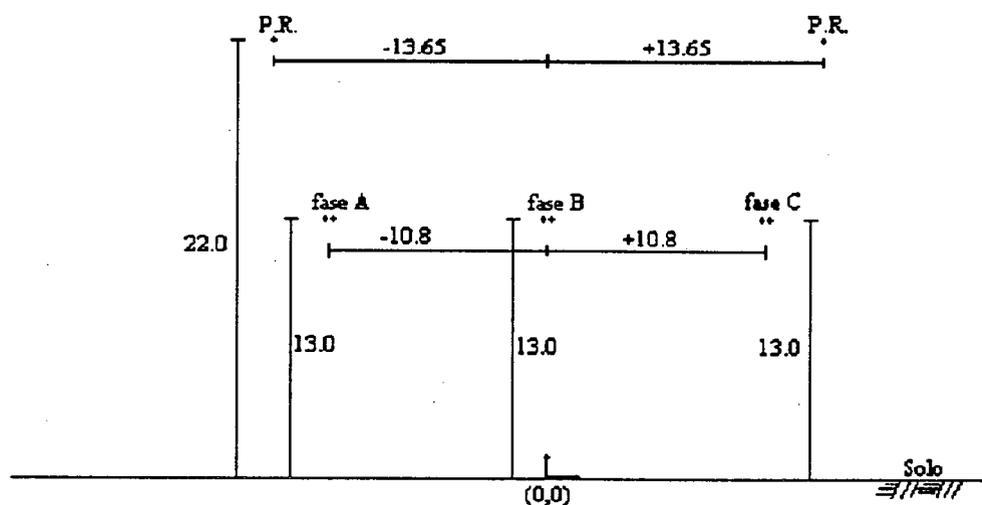


Figura 2.2 Domínio analisado para linha de 500 kV de Cobún-Alto Jahuel de ENDESA, mostrando a disposição geométrica dos cabos das fases e cabos pára-raios.

2.4.2. Malha para o domínio da LT de 500 kV de Colbún-Alto Jahuel

Para se resolver o problema do cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão através do método de elementos finitos, necessita-se gerar uma malha no domínio analisado. O domínio, para linha de 500 kV de Colbún-Alto Jahuel, varia de -40 m a 40 m no eixo horizontal, em x, com o 0 sob a fase B, e de 0 a 30 m no eixo vertical, em y, com o 0 no solo. A malha possui 7132 elementos retangulares e 6890 nós, representada na figura 2.3. Nesta malha são impostos os potenciais, que serão convertidos nos potenciais escalares elétricos complexos de acordo com a TABELA 2.2, nos nós que representam os subcondutores das fases e os cabos pára-raios. Também são inseridas as características físicas dos materiais existentes no domínio. Para o caso analisado, há apenas o ar, conseqüentemente a permissividade elétrica vale $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ (F.m⁻¹) e a condutividade vale $\sigma = 0$. A malha apresenta a região interna aos cabos pára-raios mais densa, de modo a obter uma melhor precisão nos resultados de campo elétrico, pois nesta região o campo é maior.

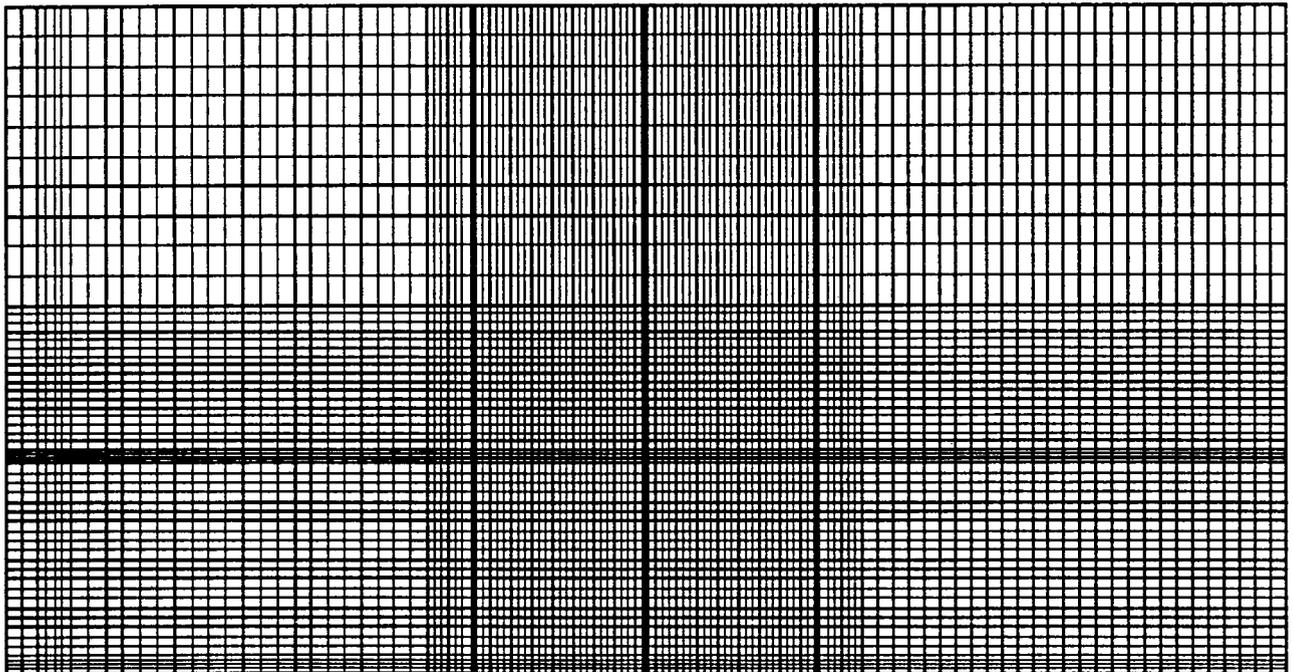


Figura 2.3 Malha de elementos finitos para a linha de transmissão Colbún-Alto Jahuel de 500 kV de ENDESA.

2.4.3. Curvas equipotenciais

A figura 2.4 apresenta as curvas equipotenciais para os seguintes potenciais (kV): 2, 5, 10, 25, 50, 100 e 150, para a linha de transmissão de 500 kV de Alto-Jahuel de ENDESA, obtidas pelo método de elementos finitos. Estes valores de potencial são o módulo do fasor potencial. As curvas equipotenciais servem para dar uma idéia da distribuição do campo. Quando se descreve o campo elétrico como uma elipse, seu eixo maior é perpendicular as linhas equipotenciais, o que dá idéia da distribuição do campo onde ele não é uniforme ou em pontos longe do plano do solo (Deno, 1976).

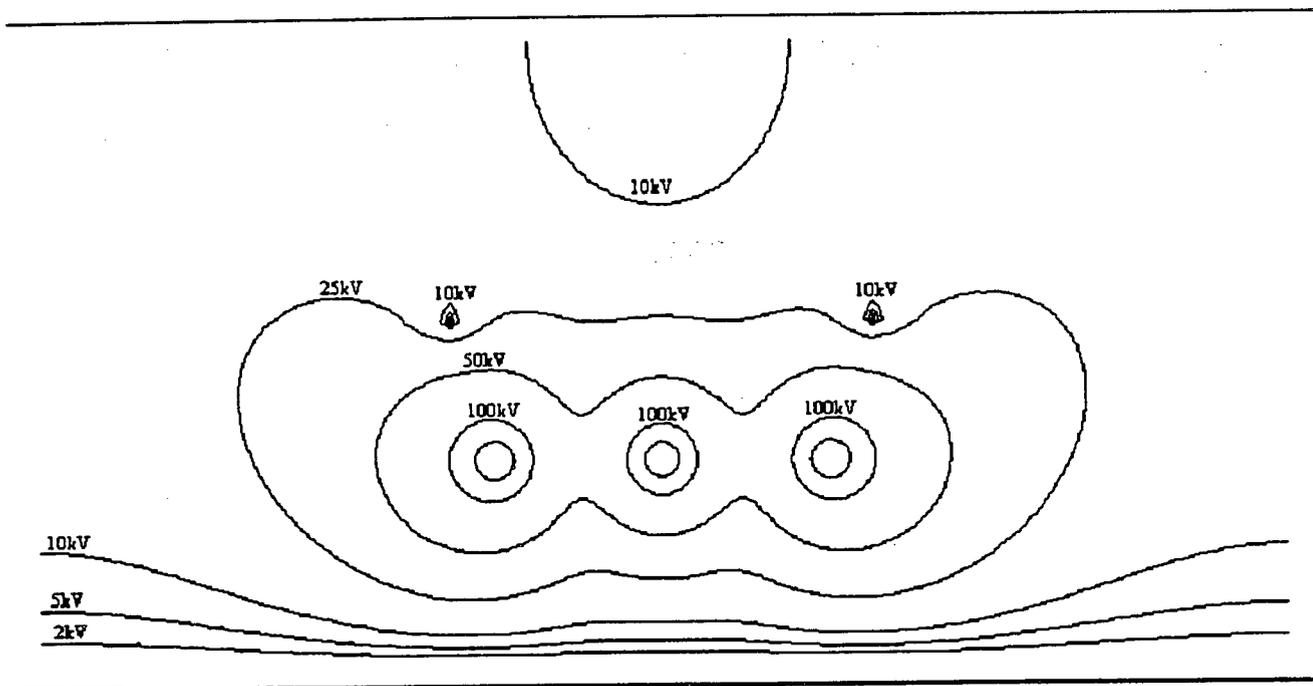


Figura 2.4 Curvas equipotenciais para linha Colbún-Alto Jahuel de 500 kV, obtidas pelo MEF.

2.4.4 Curvas de campo elétrico fornecidas pelo MEF, MSC e valores medidos

A figura 2.5 apresenta as curvas do perfil lateral da componente vertical do campo elétrico eficaz a altura de 1 m calculados pelo MEF, MSC e valores medidos para a linha de transmissão de 500 kV de Colbún-Alto Jahuel, no domínio fornecido na TABELA 2.2 e na figura 2.2.

Os valores de campo elétrico eficaz, calculados pelo MEF com a expressão (1.67), são em pontos que variam de -40 m a 40 m, no eixo horizontal. Os valores calculados pelo MSC através da expressão (1.12) são em pontos que variam de -50 m a 50 m no eixo horizontal e os valores medidos são em pontos que variam de 0 a 50 m. A altura de 1 m a

componente horizontal do campo elétrico é desprezível. Por isso se considera que o campo elétrico resultante é igual a sua componente vertical.

As medições do campo elétrico foram realizadas com o "Medidor de Campo Elétrico de Frequência Industrial "modelo 113 da Electric Field Measurement Co. Foi utilizado o procedimento de medição do IEEE, que recomenda manter o medidor a altura de 1 m do solo e a uma distância de 2,5 m do operador.

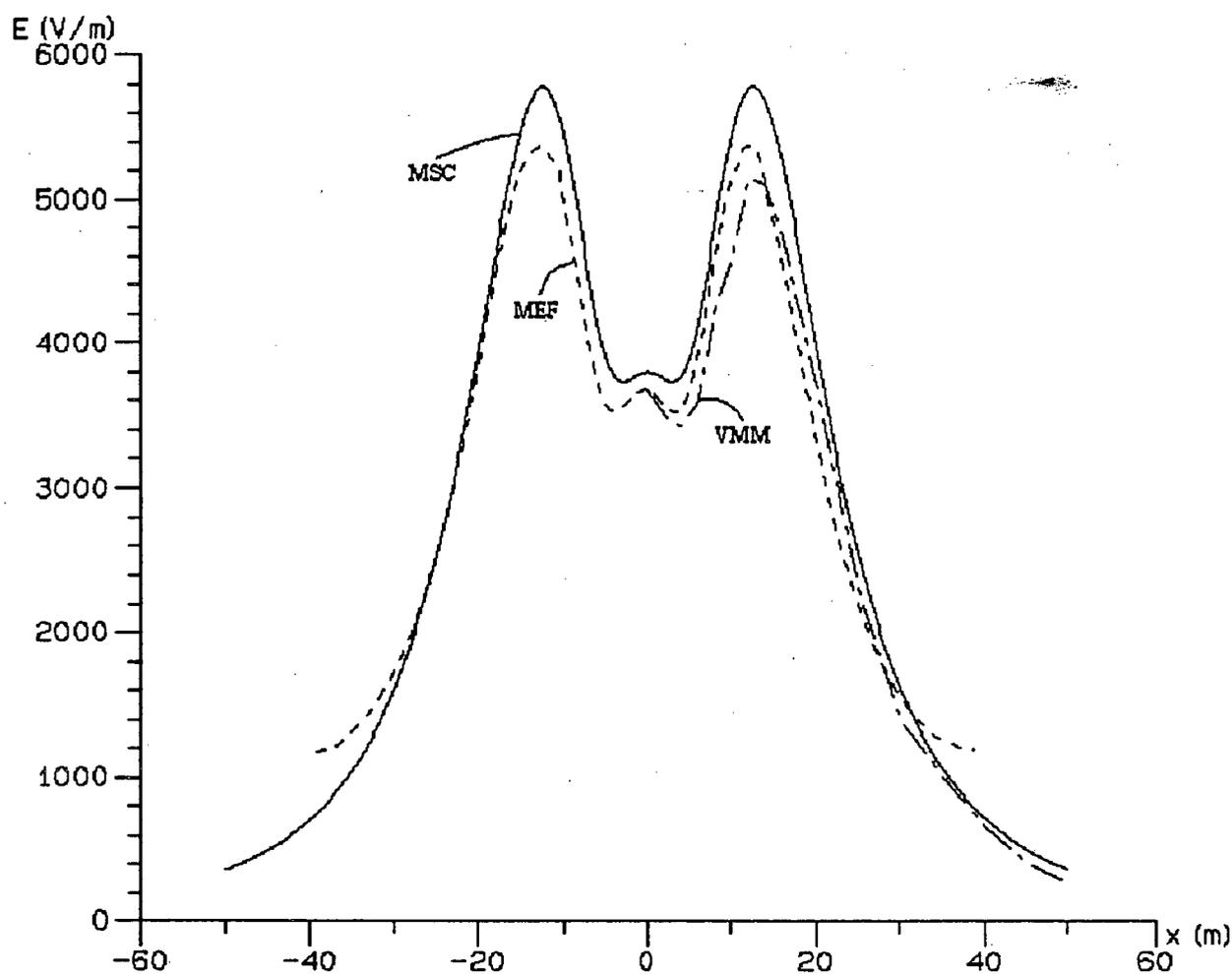


Figura 2.5 Curvas do perfil lateral da componente vertical do campo elétrico eficaz a altura de 1m, com valores fornecidos pelo MEF, MSC e medidos para linha de 500 kV de Colbún-Alto Jahuel

Para a figura 2.5 vale a seguinte simbologia:

- curva obtida pelo MSC;
- - - - curva obtida pelo MEF;
- . . . - curva dos valores médios medidos, VMM.

2.5. Linha de transmissão trifásica experimental de 1050 kV do Projeto UHV em Pittsfield, Massachusetts (Deno, 1976)

A linha de transmissão trifásica experimental de 1050 kV do projeto UHV em Pittsfield, Massachusetts, é a segunda linha analisada. O domínio de análise é um corte transversal da linha com as principais características fornecida na TABELA 2.3 (Deno, 1976). São fornecidas as coordenadas médias dos subcondutores das fases e cabos-pára-raios em relação à origem sob a fase B e no solo, suas quantidades e seus diâmetros, a distância entre subcondutores opostos no arranjo geminado, o raio equivalente deste de acordo com a expressão (1.17) e a expressão genérica da tensão de alimentação das fases.

O domínio é discretizado pela malha de elementos finitos. Com a malha e a definição dos potenciais impostos e materiais, são calculados os potenciais complexos em cada nó. A partir dos potenciais complexos, mostra-se curvas equipotenciais, em módulo, para dar idéia da distribuição do campo. Com os potenciais nos nós conhecidos, calcula-se a componente vertical do campo elétrico eficaz através da expressão (1.67) em uma linha horizontal a altura de 1m e compara-se estes valores com os valores calculados pelo MSC e valores medidos.

As medições são feitas com o medidor a altura de um metro, isto por considerar como altura de interesse para o campo em pessoas, animais e a maioria dos objetos. O medidor foi mantido a uma distância mínima de 1 m do operador que lê e segura o medidor (Deno, 1976). Deve-se ressaltar a diferença de metodologias de medidas de valores de campo elétrico entre as linhas de 1050 kV e 500 kV. Isto pelo fato de que as medições na primeira linha foram executadas em 1976, quando a influência do operador não era tão conhecida.

TABELA 2.3 - Características principais da linha de transmissão trifásica de 1050 kV, Projeto UHV, em Pittsfield, Mass. de General Electric Company (Deno, 1976)

	Fases			cabos pára-raios	
	A	B	C	Direito	Esquerdo
Nº Cond	8	8	8	2	2
Diacond	.03307	.03307	.03307	.02332	.02332
Ditdiag	1.016	1.016	1.016	.3048	.3048
REQ	.429	.429	.429	.05961	.05961
Tensão	$V_{fn} * e^{j\omega t}$	$V_{fn} * e^{j\omega t - 120^\circ}$	$V_{fn} * e^{j\omega t - 240^\circ}$	0	0
Dishorz	-15.2	0	15.2	-17.89	17.89
Altura	18.93	18.92	18.27	39	39

Onde:

Nº Cond - Número de condutores por fase ou cabos pára-raio por lado, considerando o centro da linha sobre a fase B;

Diacond - Diâmetro dos condutores das fases e diâmetro dos cabos pára-raios (em metros);

Ditdiag - Distância na diagonal entre condutores de uma mesma fase (em metros);

REQ - Raio de um condutor fictício equivalente, para um conjunto de n condutores de uma fase, que possui a mesma carga e reproduz o mesmo campo elétrico que o condutor múltiplo (em metros);

Tensão - Tensão de cada fase e dos cabos pára-raios, estes considerados multiplamente aterrados (em kV);

Dishorz- Tomando o eixo das abcissas sobre a fase B, a distância horizontal média das outras fase e cabos pára-raios a esta (em metros);

Altura- Distância vertical dos cabos pára-raios e condutores equivalentes das fases ao solo (em metros).

2.5.1. Domínio de análise para linha experimental de 1050 kV do projeto UHV

A figura 2.6 apresenta o corte transversal de um trecho da linha de 1050 kV do projeto UHV, representando a disposição geométrica dos subcondutores das fases e cabos pára-raios, considerando a referência sobre o solo e sob a fase B. São oito subcondutores por fase e dois condutores pára-raios por lado. No método de simulação de cargas considera-se a alturas médias reais dos subcondutores de cada fase. No método de elementos finitos, os subcondutores das fases A e B apresentam uma altura média de 18.92 m e a altura média dos subcondutores da fase C é de 18.27 m.

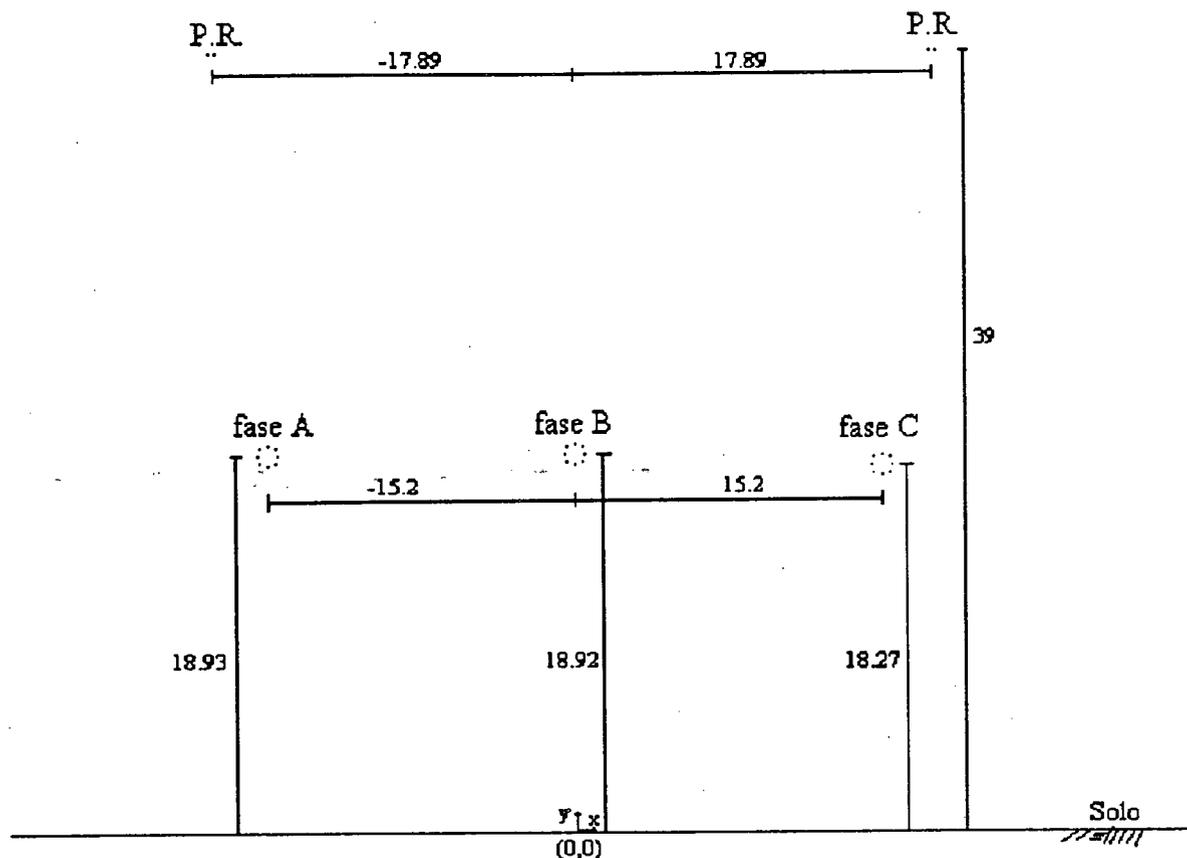


Figura 2.6 Domínio de análise para a linha de 1050 kV.

2.5.2. Malha de elementos finitos para a linha de 1050 kV

A figura 2.7 apresenta a malha de elementos finitos para o domínio de análise da linha de transmissão trifásica de 1050 kV, com 6321 nós e 6144 elementos retangulares. O domínio varia de -60 m a 60 m no eixo horizontal, em x , e de 0 a 50 m no eixo vertical. São impostos os potenciais, de acordo com a TABELA 2.1, nos nós localizados espacialmente onde se encontram os oito subcondutores de cada fase. Também são impostos potenciais nos nós representantes dos cabos pára-raios. Ao todo, nas três fases e cabos pára-raios são impostos 28 potenciais em 28 nós.

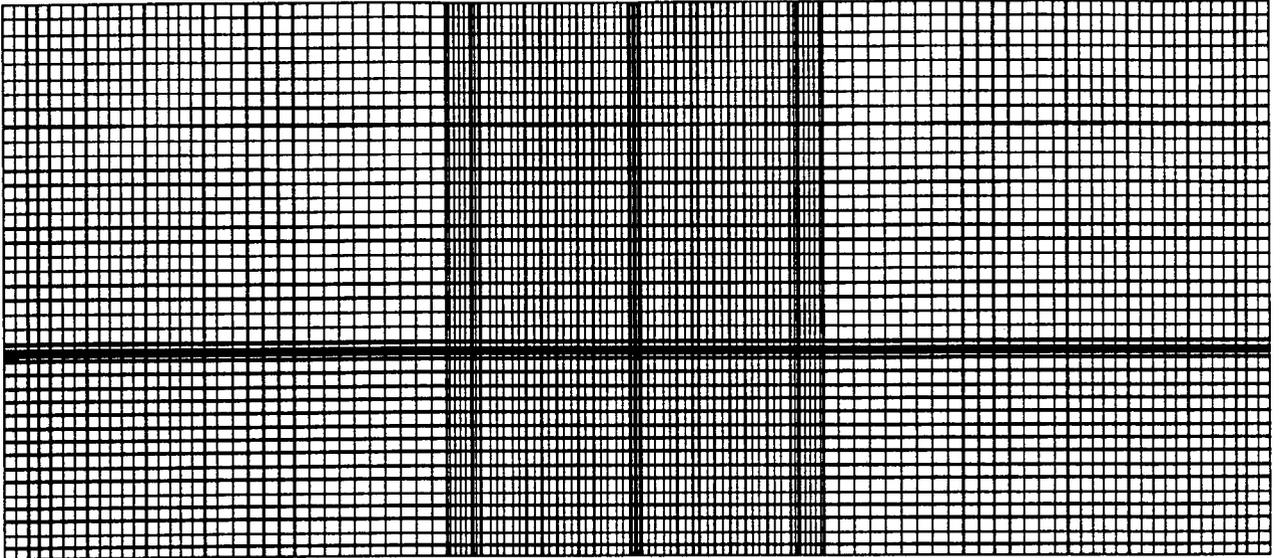


Figura 2.7 Malha do domínio para linha de 1050 kV.

2.5.3. Linhas equipotencias para linha de 1050 kV

A figura 2.8 apresenta oito linhas equipotenciais com os seguintes módulos de potencial (kV): 2, 5, 20, 50, 100, 200, 400 para a linha experimental de 1050 kV.

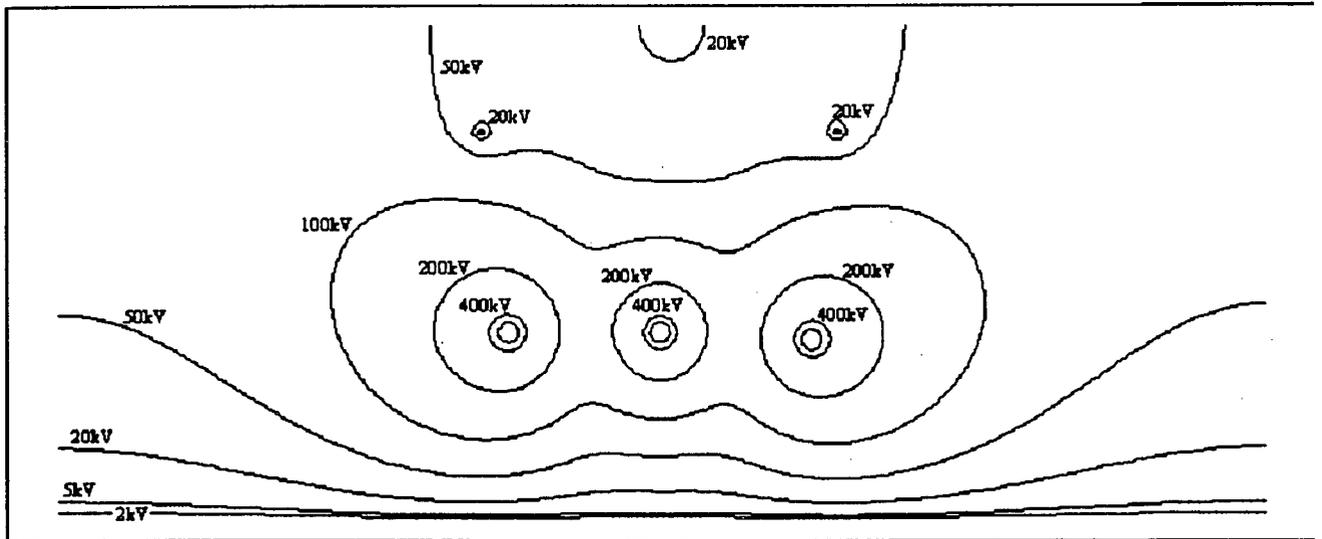


Figura 2.8 Curvas equipotenciais para linha de transmissão trifásica experimental de 1050 kV, obtidas através do MEF.

2.5.4. Curvas de campo elétrico

A figura 2.9 apresenta as curvas com o perfil lateral da componente vertical do campo elétrico da linha de transmissão trifásica experimental de 1050 kV a altura de 1 m, obtidas pelo MSC, através da expressão (1.12), do MEF, através da expressão (1.67) e valores medidos. Tanto para o para o MEF quanto o MSC, calculou-se o perfil lateral do campo elétrico em pontos variando de -60 m a 60 m no eixo horizontal. Os valores medidos fornecidos (Deno, 1976) variam horizontalmente em pontos de -25 m a 60 m. As curvas obedecem a seguinte convenção:

- curva com os valores de campo calculado através do MEF;
- - - - curva com os valores de campo calculado através do MSC;
- . . . - curva com os valores de campo medidos, VMM.

Note-se que sob a fase C, o campo elétrico é maior, pois a altura do arranjo geminado desta fase é menor que a dos outros arranjos geminados das outras fases.

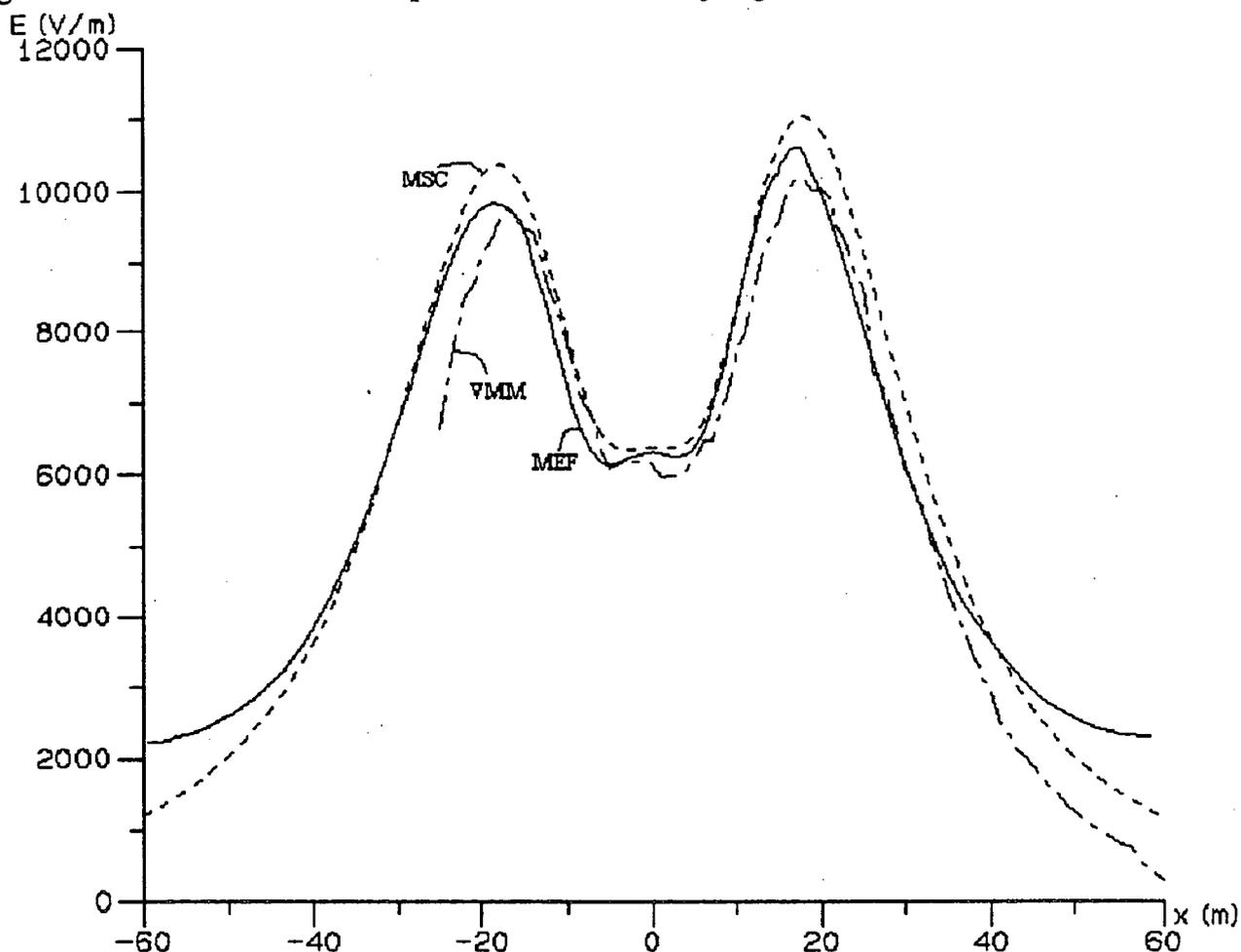


Figura 2.9 Perfil lateral da componente vertical do campo elétrico a altura de 1 m, para linha de 1050 kV.

2.6. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados o domínio de estudo, a malha gerada, linhas equipotenciais e curvas da componente vertical do campo elétrico eficaz a altura de 1 m em um trecho de duas linhas de transmissão: a Colbún-Alto Jahuel de 500 kV e uma experimental de 1050 do projeto UHV, em Pittsfield, Massachussets.

Das figuras 2.1 e 2.4 se conclui que os valores de campo elétrico calculados pelo MEF apresentam boa concordância com os valores calculados pelo MSC e com os valores medidos. Assim se comprova que o conceito de potencial escalar elétrico complexo é adequado para o cálculo do campo elétrico eficaz gerado por linhas de transmissão através do método de elementos finitos.

A malha gerada com aproximadamente 7000 elementos e nós foi necessária para que conseguisse obter uma curva de campo elétrico eficaz através do MEF que concordasse bem com a curva de campo calculada pelo MSC e os valores medidos. Onde a malha é mais densa, a concordância entre as curvas é maior. E no contorno, onde definido como condição de Neumann, maior é a diferença entre a curva obtida por MEF e as outras duas. Isto se deve ao fato de que ou o potencial se anula apenas no infinito ou o campo elétrico não é paralelo ao contorno. A primeira situação ocorreria se fosse assumida uma condição de contorno de Dirichlet e a segunda se assumida uma condição de contorno de Neumann, o caso no presente trabalho. Está implícito ao se assumir a condição de contorno de Neumann que o campo é paralelo a este. Como o potencial se anula no infinito, seria conveniente a abordagem pelo modelamento do infinito.

As diferenças entre os valores de campo calculados e os valores medidos decorrem ou das simplificações de análise e/ou das limitações de medição.

A limitação da precisão dos valores medidos surge devido a vários fatores, entre os quais: o erro pela dificuldade de posicionar o centro do aparelho na mesma orientação do eixo de medição, a condutividade do cabo utilizado para segurar o aparelho de medição situado a distância de 2.5 metros do operador, a distorção do campo elétrico provocado pelo corpo do operador que segura o cabo, os erros de leitura, a temperatura ambiente, umidade relativa do ar, a presença da vegetação que altera o terra virtual, a extratificação do solo e/ou não-homogeneidades, a condutividade não nula do solo, irregularidades na superfície do solo e a flexa da linha que altera sua altura. O corpo do operador é um dos aspectos que mais influenciam na precisão da medição (Ortiz e Portela, 1992; Diplacido et. al., 1978).

Os erros de análise decorrem das simplificações efetuadas durante o cálculo do campo elétrico, tais como: supor o solo plano com potencial nulo, no caso do MSC desconsiderando-se objetos sob a linha, a vegetação que eleva o terra virtual, ou seja, o potencial é nulo na superfície externa da vegetação. O MEF permite que se simule objetos e vegetação sob a linha. Para o caso de terrenos irregulares, o método proposto em (Sendaula et. al., 1983) propõe que estas irregularidades sejam levadas em

consideração, onde a distribuição de cargas sobre a superfície do solo é substituída por uma distribuição discreta de linhas de carga de comprimento infinito. A ondulação da tensão, as suas harmônicas e seu desbalanceamento não são levados em conta (Portela e Ortiz, 1990). Os erros são válidos tanto para o MEF quanto o MSC, a não ser que especificado para um ou outro método.

SEGUNDA PARTE**EFEITOS DOS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS SOBRE SERES
VIVOS**

CAPÍTULO 3- O EFEITO DE POTENCIAIS ELÉTRICOS SOBRE SERES HUMANOS

3.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada uma pequena bibliografia sobre alguns dos efeitos sobre o organismo humano devido a curta e longa exposição a campos elétricos e magnéticos de extremamente baixa frequência (EBF), em torno de 60 Hz. Ver figura 3.1 que apresenta um quadro demonstrativo dos assuntos a serem tratados.

Os efeitos de curta duração se relacionam com a passagem de corrente no corpo humano devido a contato direto e faiscamento. As correntes se classificam em quatro categorias, por intensidade: percepção, libertação, parada respiratória e fibrilação ventricular. Estuda-se, também, a percepção direta do campo elétrico e magnético.

O estudo dos efeitos dos campos elétricos e magnéticos para exposição prolongada inicia com a apresentação de alguns mecanismos de interação entre campos e o organismo como correntes induzidas por variação da indução magnética ou por campo elétrico, movimento de magnetita existente no corpo e forças de Lorentz. São apresentadas fontes de campos magnéticos e valores de indução gerados por estas fontes. E, por fim, alguns dos alegados efeitos sobre o organismo humano: a relação com o câncer, com a alteração do ritmo circadiano e com as células e órgãos.

Inicialmente é feita a delimitação dos efeitos sobre o organismo humano dentro do contexto da radiação eletromagnética e seu efeito no ambiente de incidência.

3.2 Delimitação do problema dos efeitos de campos eletromagnéticos sobre o organismo humano

A compatibilidade eletromagnética (EMC, em inglês) se relaciona tanto com a capacidade dos sistemas eletrônicos de funcionar em seus parâmetros nominais num ambiente eletromagnético, conhecida como interferência eletromagnética (EMI), como com os efeitos deste ambiente sobre os organismos biológicos e outros sistemas sensíveis, o risco eletromagnético (EMR) (Cristea, 1994). A segunda parte, relativa aos efeitos em pessoas, é a que interessa no presente trabalho.

A atividade dos especialistas se orienta em dois lados:

1) O lado técnico - A identificação e padronização das fontes, a medição e supressão ou redução dos campos eletromagnéticos ;

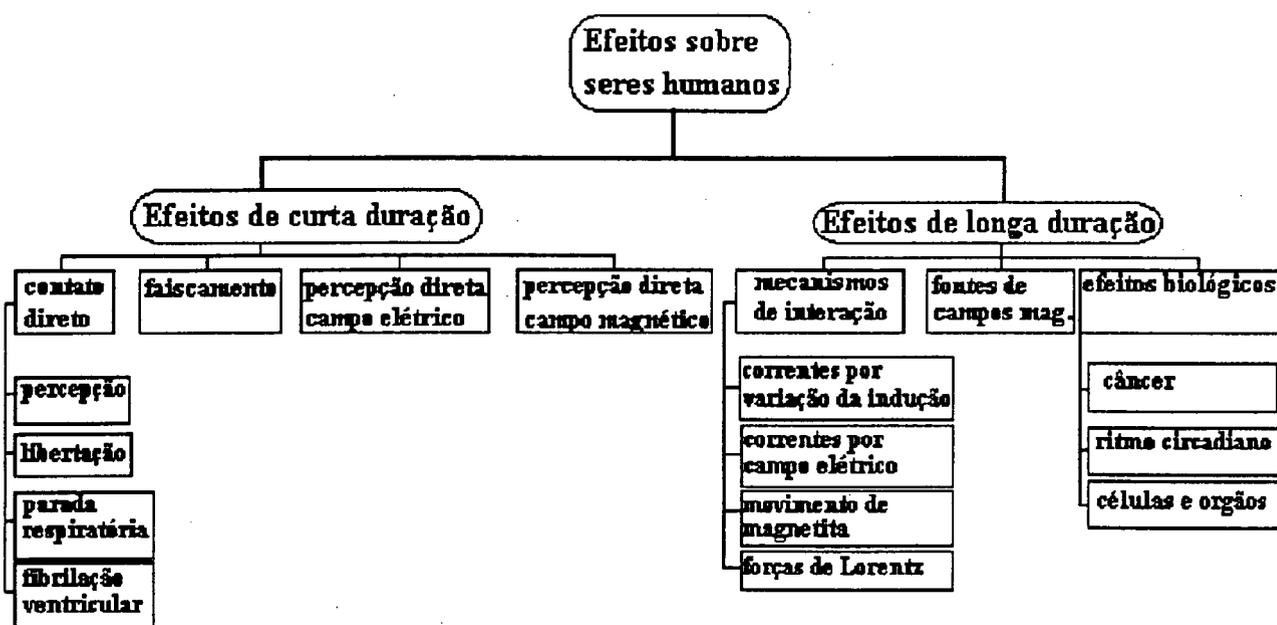


Figura 3.1 Quadro descritivo dos assuntos tratados

2) O lado biológico - A identificação dos efeitos destes campos sobre diferentes organismos e do mecanismo de interação entre o campo-organismo.

As principais fontes de campos eletromagnéticos e sua classificação são dadas na TABELA 3.1 (Cristea, 1994).

Uma das características mais importantes da EMR é a medição da intensidade do campo elétrico e da indução magnética. Os procedimentos, requisitos e instrumentos de medição e padronização apresentam-se em (Cristea, 1990; ANSI/IEEE, 1987; CE/IEC, 1987).

Pelo lado técnico da EMR, há um tratamento bem fundamentado, enquanto o mesmo não ocorre pelo lado biológico, onde os vários estudos não puderam dar uma resposta definitiva a pergunta: o ambiente eletromagnético representa um perigo à saúde da população e de alguns profissionais? Do mesmo modo também não puderam explicar o mecanismo da ação biológica do campo eletromagnético.

Para se enquadrar bem a problemática do EMR são classificados os problemas ambientais enfrentados pela sociedade humana em três níveis (Cristea, 1994):

1) Problemas de primeira linha, como o aumento generalizado da temperatura atmosférica, as seqüelas de uma guerra nuclear, que têm impacto global sobre a sobrevivência da espécie humana e de sua civilização;

TABELA 3.1- Classificação das principais fontes de campos eletromagnéticos

Fontes	
1) Naturais	
a) Terrestres	- Raios e descargas elétricas
	- Fontes locais (Precipitações, tormentas de areia ou de pó)
b) Não-terrestres	- Raios cósmicos
	- Radiação solar
2) Artificiais	
a) Não intencionais	-Linhas de transmissão/distribuição
	- Máquinas elétricas
	-Sistemas de acionamento de motores
	- Lâmpadas fluorescentes
	- Receptores de rádio e televisão
	- Sistemas de computação
	- Eletrodomésticos (Batedeira, massageadores, aspirador de pó, geladeira, cobertor elétrico, secador de cabelo)
	- Fiação elétrica residencial
b) Intencionais	- Emissoras de rádio e televisão
	- Radares
	- Repetidoras de rádio e TV
	- Controles remoto

2) Problemas de segunda linha, como os derrames importantes de petróleo, a erosão e o desgaste do solo ou a poluição maciça do ar, do solo e da água, que têm efeitos sobre ecossistemas locais e determinadas espécies biológicas;

3) Problemas de terceira linha, como as distintas enfermidades locais, poluições localizadas do ar ou do solo, presença de produtos químicos em alimentos ou radiações, que têm impacto limitado sobre a saúde das pessoas.

A problemática da exposição humana a radiação eletromagnética se encontra neste terceiro grupo.

A radiação eletromagnética se classifica em duas:

- Radiação ionizante, como os raios X, raios gama ou cósmicos, com frequência superiores a 10^{18} Hz e portadora de grande energia.

- Radiação não-ionizante. Produzida por sistemas elétricos e eletrônicos ou fontes naturais no espectro de frequências de 1 Hz a 40 GHz, que transportam uma energia relativamente pequena.

O presente estudo se concentra na radiação não-ionizante, com maior interesse na frequência industrial, 50 - 60 Hz, produzido por sistemas elétricos de geração, transporte, distribuição e consumo com seu efeito de longa duração e na passagem de corrente elétrica de curta duração pela corpo humano.

3.3. Classificação dos efeitos de curta duração sobre seres humanos a partir de acoplamento de campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão

Reações a estímulos elétricos devidos a acoplamentos elétricos e magnéticos entre a linha de transmissão (LT) são organizados em quatro categorias principais (Delaplace e Reilly, 1978): 1) Correntes de contato direto quando uma pessoa toca um condutor elétrico; 2) Faiscamento produz correntes transitórias que entram no corpo através de um arco quando a rigidez dielétrica do ar é rompida por diferenças de potenciais elétricos superiores ao permitido; 3) Campos elétricos induzem cargas elétricas na superfície do corpo, que exercem forças sobre o cabelo, e induzem correntes e 4) Campos magnéticos induzem correntes internas.

Para efeitos de curta duração, as correntes de contato direto e as correntes transitórias por faiscamento são as mais importantes porque a primeira pode alcançar valores que podem ser danosas ao organismo e a segunda pode provocar aborrecimentos ou sensações desconfortáveis ou efeitos secundários devido ao susto pelo choque. Os efeitos diretos de campos elétrico e magnético são menos importantes para estímulos de curta duração nos níveis produzidos nas faixas de passagem das LT. A corrente e não a tensão é o critério adequado para definir a intensidade do choque elétrico (Hammam e Baishiki, 1983).

3.3.1. Classificação das reações a passagem de corrente elétrica em seres humanos

São 4 os tipos principais de reações à passagem da corrente elétrica: 1) Percepção; 2) Libertação; 3) Parada respiratória e 4) Fibrilação Ventricular (Hammam e Baishiki, 1983).

O menor nível de estímulo é a **percepção**, onde uma pessoa é capaz conscientemente de detectar se há ou não um estímulo presente associada a uma dada probabilidade. Estatisticamente, conforme aumente os níveis de corrente, haverá um número crescente de pessoas que a percebem, assim uma probabilidade de 2% de percepção, significa que provavelmente 2% da população teriam percebido esta corrente. A sensação no limiar de percepção é suave e não necessariamente desagradável.

Este nível de estímulo estabelece o nível abaixo do qual não há efeitos importantes de curta duração. Os efeitos de longa duração, serão analisados posteriormente.

O segundo nível é o **limiar de libertação**, que é o menor estímulo que uma pessoa pode sofrer, perdendo o controle da musculatura que foi involuntariamente contraída. Neste nível uma pessoa não consegue libertar-se de um condutor elétrico que agarrou.

O terceiro nível é a **parada respiratória**, onde a pessoa é incapaz de respirar enquanto o estímulo permanece atuante, devido a contração da musculatura responsável pela respiração porque uma corrente passa pelo tórax.

E o quarto nível é a chamada **fibrilação ventricular**, onde o estímulo provoca contrações assíncronas descoordenadas do coração, cessando o bombeamento sanguíneo.

3.3.2. Reações a passagem de corrente produzida por contato direto

O estado da pele, se seca ou molhada, intacta ou cortada, determina consideravelmente a quantidade de corrente elétrica que fluirá no corpo humano com a aplicação de uma tensão (Hammam e Baishiki, 1983). Para pele seca, inteira, o valor da resistência através de membros (i. e., mão-mão ou mão-pé) pode ultrapassar 100.000 Ω (Dalziel, 1972). A resistência elétrica cai muito se a pele é cortada ou molhada. Nesta situação, a resistência da gordura subjacente a pele pode adquirir grande importância. O valor de 1000 Ω representa o valor de resistência entre membros para uma pessoa com pele molhada ou suada. A CELESC utiliza este valor como resistência equivalente do corpo humano.

A densidade de corrente no corpo é o parâmetro mais importante na definição das reações por contato direto. Esta poderá depender do nível de corrente, a posição do corpo no qual ela entra, a área superficial e geometria do contato elétrico.

A TABELA 3.2 apresenta o resumo dos limiares de reação que são consagradamente classificados como percepção, libertação, parada respiratória e fibrilação ventricular (Keeseey e Lectcher, 1969). E no Anexo A apresenta-se os conceitos de tensão de toque e tensão de passo relativos a correntes no corpo devido a correntes de falta e a queda de raios. Os subítens seguintes fornecem mais detalhes sobre os diversos tipos de reações a estímulos elétricos.

TABELA 3.2 - Níveis limites para corrente de contato a 60 Hz

Correntes rms (mA)	Reação Limite/ Sensação
	Percepção
0.09	Percepção de toque para 1% das mulheres
0.13	Percepção de toque para 1% dos homens
0.24	Percepção de toque para 50% dos mulheres
0.33	Percepção de aperto para 1% das mulheres
0.36	Percepção de toque para 50% dos homens
0.49	Percepção de aperto para 1% dos homens
0.73	Percepção de aperto para 50% das mulheres
1.10	Percepção de aperto para 50% dos homens
	Libertação
4.5	Libertação estimada para 0.5% das crianças
6.0	Libertação para 0.5% das mulheres
9.0	Libertação para 0.5% dos homens
10.5	Libertação para 50% das mulheres
16.0	Libertação para 50% dos homens
	Parada Respiratória
15	Dificuldade respiratória para 50 % das mulheres
23	Dificuldade respiratória para 50 % dos homens
	Fibrilação Ventricular
35	Corrente de fibrilação de 3 s estimada para 0.5 % das crianças de 20 Kg
100	Corrente de fibrilação de 3 s estimada para 0.5 % de adultos com 70 Kg
	Padrões Estabelecidos
0.5	ANSI- Padrão para máxima corrente de fuga (dispositivos portáteis)
0.75	ANSI- Padrão para máxima corrente de fuga (dispositivos instalados)
5.0	NESC- Limite recomendado para correntes induzidas sob linhas de transmissão
5.0	ELETROSUL- Limite recomendado para correntes induzidas sob linhas de transmissão

3.3.2.1 Percepção

A percepção à corrente elétrica depende de onde e qual a área de contato para a corrente entrar no corpo. Se a pela roça uma superfície suave, as correntes percebidas podem chegar a valores tão baixos quanto 0.01 mA, parecendo que a superfície está vibrando (Smoot e Stevenson, 1968). Podem ser percebidas correntes bem abaixo do limiar de percepção se passarem através da língua ou de feridas abertas (Dalziel, 1956).

A figura 3.1 apresenta a distribuição dos limiares de percepção de corrente entrando na mão (Modificado de Dalziel, 1954). O limiar de percepção para contatos por aperto baseou-se nas respostas de 167 homens. O limiar de percepção quando o dedo médio tocou levemente ou bateu de leve numa placa baseou-se nas respostas de 25 homens. Enquanto que 50% dos homens podem detectar correntes em contatos por aperto de 1.1 mA, para contatos de toque, nesta mesma percentagem, o limiar da corrente cai a 0.36 mA. Baseado em testes anteriores realizados com 42 homens e 28 mulheres, foi determinado que o limiar de percepção de corrente para mulheres era 0.67 do limiar de percepção para os homens para vários tipos de contatos com as mãos (Tompson, 1933). As curvas de distribuição para mulheres na figura 3.1, deste modo, foram determinadas ao se aplicar o fator de 0.67 na curva dos homens.

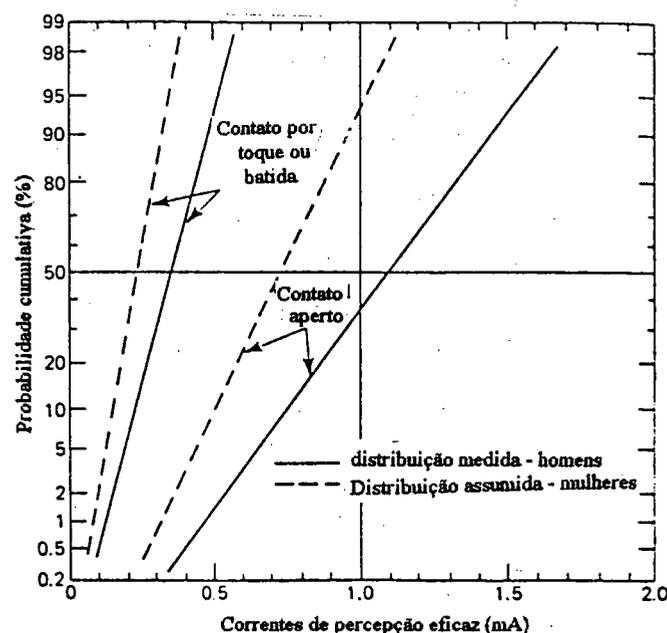


Figura 3.1 Correntes de percepção de 60 Hz aplicados na mão (Dalziel, 1954)

3.3.2.2 Libertação

Quando se aumenta a corrente além do limiar de percepção, a sensação de formigamento transforma-se em desconforto, acompanhado de contração muscular. A contração muscular aumenta com a corrente até o ponto em que a pessoa não consegue libertar-se de um condutor por ela agarrado. Este valor de corrente é denominado limiar de libertação.

Correntes de libertação não necessariamente provocam perigo imediato. Um homem saudável pode ser repetidamente sujeito a valores de corrente até o valor de libertação sem apresentar efeitos além de uma temporária irritação muscular (Osypka, 1966). Contudo, se uma pessoa é exposta a uma corrente um pouco superior a da libertação, que passe através do tórax, a respiração torna-se difícil. Eventualmente, a pessoa pode ficar exausta e morrer por asfixia (Dalziel, 1956). Correntes de libertação, por esta razão, podem ser letais se o tempo de exposição for prolongado.

A figura 3.2 apresenta valores de corrente de libertação para 28 mulheres e 134 homens baseado em testes feitos por Dalziel (Dalziel, 1956). Para níveis de segurança, ou seja, máximo valor de corrente permitida que atravesse pessoas, considera-se uma corrente de libertação que atue sobre 0.5% da população. Os dados de Dalziel indicam que este nível é de 9.0 mA para os homens e 6.0 mA para mulheres. Para 0.5% das crianças pequenas é estimado em metade da corrente de libertação de homens adultos, ou seja, 4.5 mA. Whitaker (Hammam & Baishiki, 1983) estabeleceu 5 mA como a corrente ininterrupta máxima, na frequência de 60 Hz, que uma criança de 2 anos poderia ser exposta com segurança.

Os limiares mais altos para uma dada pessoa são plotados na figura 3.2. Em trabalho posterior (Dalziel, 1969), Dalziel notou que com motivação, os limiares de libertação são em nível maior, atingindo 18 mA. No caso de acidente, quando a pessoa teme por sua vida, a motivação para libertar-se é maior. Considerando-se que a habilidade para libertar-se está relacionada com a motivação, conclui-se que a figura 3.2 apresenta estimativas conservadoras de limiares.

3.3.2.3. Parada respiratória

Correntes um pouco superiores àquelas do limiar de libertação podem ser consideradas potencialmente letais porque podem provocar dificuldades respiratórias se passarem através do tórax. Correntes alternadas de 60 Hz entre 18 e 22 mA, podem provocar paralisia respiratória em adultos quando fluindo através do tórax. 30 mA é um limiar de parada respiratória que é freqüentemente fatal (Hammam e Baishiki, 1983).

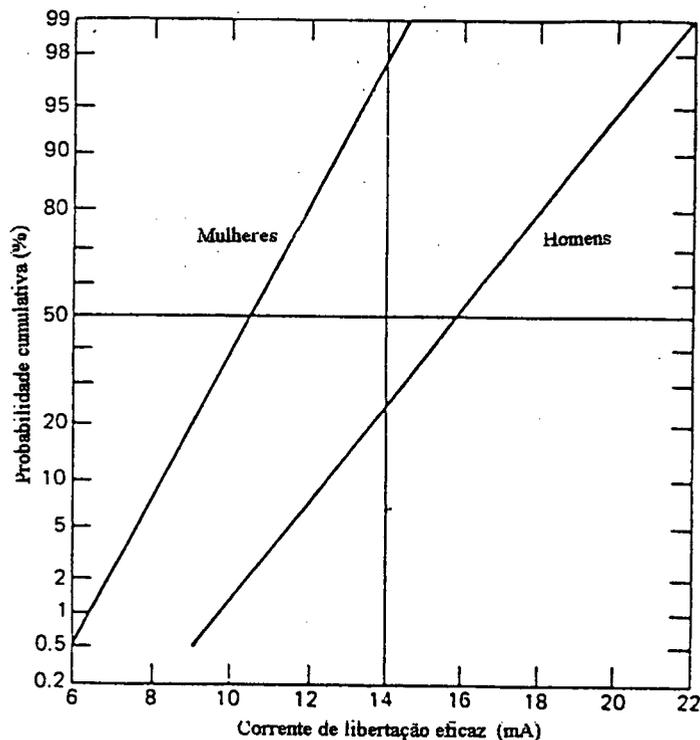


Figura 3.2 Limites de distribuição de corrente de liberação para adultos (Dalziel, 1956)

3.3.2.4 Fibrilação ventricular

Se uma corrente suficientemente intensa passa através do coração, mesmo sem provocar destruição física de tecido, as contrações poderão se tornar assíncronas e descontroladas, cessando o bombeamento do sangue. Uma vez que a fibrilação ventricular ocorreu, o coração dificilmente retorna ao ritmo normal, necessitando de ajuda de um desfibrilador.

Reconhece-se a importância da aplicação do choque durante o período vulnerável do ciclo do coração. O ciclo cardíaco compreende basicamente dois períodos: O período da contração (sístole) e o período de relaxação (diástole). O período vulnerável de aproximadamente 20% do ciclo cardíaco é durante a transição da sístole para diástole. O termo médico para esta região de transição é fase refratária parcial (FRP) (Hammam e Baishiki, 1983). Existem evidências que a fibrilação ventricular pode ocorrer em choques de muito curta duração durante a fase refratária parcial. Com o aumento da duração do choque, a possibilidade de ocorrer a fibrilação ventricular aumenta porque a fase refratária parcial pode ser alcançada pelo choque.

Os parâmetros que influenciam na fibrilação ventricular são: O peso do corpo, a duração e magnitude da corrente.

Devido a impossibilidade de se conhecer as correntes de fibrilação através de testes em seres humanos, é necessário extrapolar de experiências em animais. A figura 3.3 apresentam um gráfico sugerido para a análise de dados de sete espécies de mamíferos com pesos entre 20 e 100 Kg (Dalziel, 1960). A linha com 0.5% é recomendada para análise de segurança humana. As correntes, na figura 3.3, tiveram duração de 3 s.

Dalziel (Dalziel, 1960) fornece uma relação entre o limiar de fibrilação e o tempo de duração do choque elétrico, que se comporta bem em tempos de exposição variando de 8.3 ms a 5 s.:

$$i(t) = \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (3.1)$$

onde

$i(t)$ - valor da corrente eficaz correspondente a uma dada probabilidade de fibrilação ventricular, em Amperes;

t - tempo de duração do choque elétrico , em segundos;

k - constante estatística dependendo do peso do corpo. Vale 0.116 para uma pessoa de 50 Kg e probabilidade de fibrilação de 0.5%. Para pessoa de 70 Kg e probabilidade de 0.5% de fibrilação, $K=0.157$.

Dados experimentais em seres humanos são limitados por causa dos riscos envolvidos. Valores no limiar de fibrilação são obtidos de estudos em animais que são extrapolados para seres humanos, devido a descoberta de que a corrente de fibrilação ventricular é proporcional ao peso do corpo e do coração (Hammam & Baishiki, 1983). Porém, as diferenças das formas dos primatas e quadrúpedes podem afetar a densidade de corrente que atravessa o coração, em consequência de correntes aplicadas nos membros dianteiros. Isto gera incertezas quando se extrapola de animais para seres humanos os limiares de fibrilação. Por este razão, é prudente ser conservativo na estimação dos limiares de fibrilação para pessoas. Uma estimativa conservadora é o limiar de fibrilação para 0.5% da população, ou seja, uma corrente limite que provoque a fibrilação ventricular em 0.5% da população.

Da figura 3.3, se retira que a corrente necessária para fibrilação de adultos pesando 70 Kg é em torno de 100 mA, para exposição de 3 s. E o nível de corrente equivalente para crianças pequenas com peso de 20 Kg é 35 mA. Estes níveis de corrente estão muito acima dos níveis de libertação. Por isso, correntes potencialmente letais são consideradas em termos de libertação em vez de fibrilação.

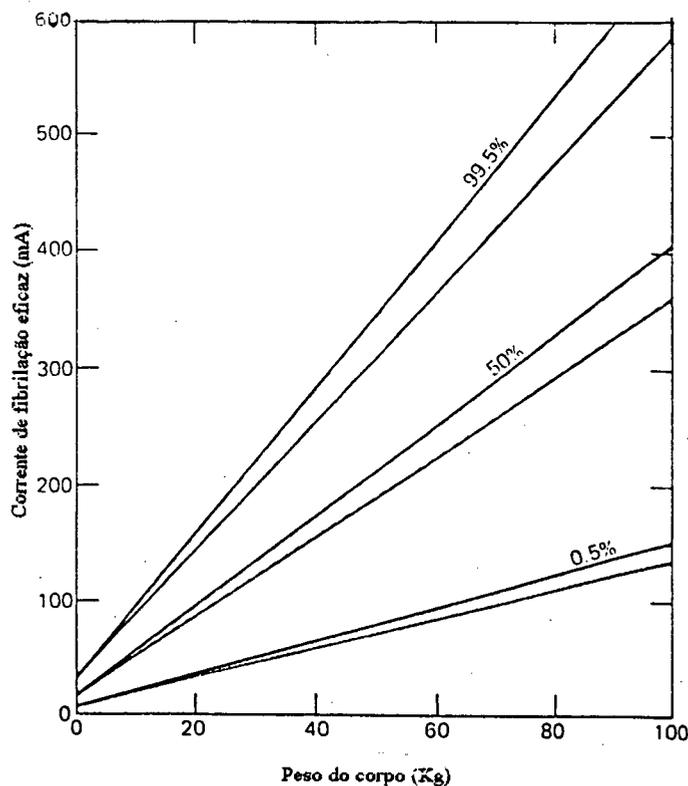


Figura 3.3 Correntes de fibrilação ventricular de 3 s baseados em experiências com animais (Dalziel, 1960)

3.3.3. Reação ao faiscamento

Quando uma pessoa está dentro ou próxima à faixa de passagem de uma linha de transmissão, faiscamento capacitivo poderá ocorrer entre a pessoa e um objeto condutor. Nesta situação, a pessoa ou objeto atuam como um capacitor no qual é induzido uma carga elétrica pela ação do campo elétrico gerado pela linha de transmissão. Quando o objeto condutor e a pessoa estão muito próximos, uma fração de centímetro, pode-se romper a rigidez dielétrica do ar, criando um arco elétrico.

Freqüentemente, a corrente que passa através do faiscamento é sentida, sendo esta corrente abaixo do limiar de percepção para correntes de contato direto, por exemplo,

numa situação em que se segura um condutor. A diferença de percepção está em que a corrente de contato direto é geralmente distribuída numa região maior do que a corrente por faiscamento, onde esta corrente pode penetrar através de uma área muito pequena. Com isto, o que muda, é a densidade superficial de corrente, maior no caso do faiscamento.

Testes sobre as reações de pessoas ao faiscamento foram conduzidos nas instalações de pesquisa em alta tensão do Projeto UHV em Pittsfield, Massachusetts, EUA, com a intenção de avaliar como pessoas reagem aos efeitos do campo elétrico, sem possuir rigoroso controle científico.

A reação das pessoas ao faiscamento AC depende da tensão de circuito aberto apresentada por um objeto coletor de cargas bem como de sua capacitância em relação ao solo.

Numa relação de tensão eficaz de circuito aberto com capacitância do objeto coletor, os níveis de percepção média parecem situar-se ao longo de duas regiões distintas: abaixo dos 575 pF, a percepção segue um limiar que é proporcional a energia, do sistema formado pelo objeto coletor de cargas submetido a uma tensão de circuito aberto, constante e acima dos 575 pF, a percepção segue um limiar proporcional a carga, no objeto coletor, constante. Então, têm-se a TABELA 3.3 onde é apresentada limites de percepção, apresentada para três condições de clima, de acordo com os testes feitos no Projeto UHV (Delaplace & Reilly, 1978).

TABELA 3.3 - Limites estimados para percepção de faiscamento.

			$C \leq 575 \text{ pF}$	$C \geq 575 \text{ pF}$
Temp. (°C)	U.R. (%)	Precepitação	Lim. CV_{rms}^2 (J)	Lim. CV_{rms} (mC)
.6 - 1.7	48-53	seco	0.35	0.45
10-16.7	50-75	seco	0.14	0.29
13.3-18.3	75-90	chuvoso	0.07	0.20

Lim - Limiar constante;

V_{rms} - Tensão de circuito aberto na ausência de faiscamento;

U.R.- Umidade relativa.

3.3.4. Percepção direta do campo elétrico

Cargas são induzidas na superfície de objetos condutores que estão dentro de um campo elétrico. Em campos alternados, estas cargas aparecem como correntes alternadas que podem penetrar abaixo da superfície da pele, no caso do condutor ser o corpo de uma pessoa. Estímulos devido a efeitos diretos do campo elétrico são provocados pelas cargas que estão sob a superfície da pele, principalmente. Tais cargas criam uma força sobre os pêlos, causando uma vibração mecânica que pode ser percebida. Uma sensação de vibração entre as roupas e pele algumas vezes também pode ser percebida.

Foram realizados testes em Pittsfield, MA, nas instalações do projeto de alta tensão do projeto UHV, com 122 homens e 8 mulheres, para conhecer quais as reações de pessoas ao campo elétrico direto (Delaplace & Reilly, 1978). Estes testes não possuem rigor científico, porém fornecem informações úteis referentes às reações das pessoas ao campo elétrico.

Poucas pessoas indicaram percepção a campos muito pequenos, em torno de 2kV/m ou menos. Para intensidades de campos elétrico de aproximadamente 8 kV/m, muitas pessoas relatam sensações similares a de uma brisa suave. Em mais altos níveis de campo, as sensações algumas vezes são descritas como faiscamento distribuído.

3.3.5. Percepção direta do campo magnético

Induções magnéticas nas vizinhanças de uma LT AC são normalmente menores do que 10^{-4} T ao nível do solo. Níveis bem acima deste valor produzem sensações identificáveis em pessoas. Acredita-se que estas sensações são provocadas por correntes elétricas induzidas (Kaufman e Michaelson, 1974). Calculou-se o campo magnético necessário para produzir uma densidade de corrente no corpo humano para ultrapassar o limiar de percepção de 1 mA/m^2 (Spiegel, 1976): a indução magnética deveria ser superior a 1 T.

Experimentos para a percepção direta de campos magnéticos de 60 Hz foram realizados ou com uma pequena bobina aplicando uma indução de $15 \cdot 10^{-4}$ T na cabeça ou com uma grande bobina aplicando $7.5 \cdot 10^{-4}$ T sobre o corpo todo. Para o campo gerado pela bobina pequena, não houve uma percepção estatisticamente satisfatória. Para o campo gerado pela bobina grande, algumas pessoas demonstraram uma percepção estatisticamente satisfatória. Dos experimentos percebe-se que as pessoas notam outra coisa distinta do campo, como vibração ou som de baixa frequência (Delaplace & Reilly, 1978).

Baseados nas evidências experimentais disponíveis, campos magnéticos que podem ser produzidos dentro das faixas de passagem de LT não têm apresentado sensações identificáveis prontamente em pessoas. Conclui-se que, se existirem estímulos produzidos pelo campo magnético gerado em LT, os efeitos são muito sutis.

3.4. Efeitos de longa duração de acoplamentos elétricos e magnéticos sobre seres humanos devido a linhas de transmissão

Serão apresentados neste item e subseqüentes alguns dos efeitos dos campos elétricos e magnéticos para tempos de exposição prolongados, mostrando a atuação dos campos sobre pessoas e as controvérsias se estes campos apresentam ou não riscos à saúde das pessoas. A apresentação se dá em caráter ilustrativo, visto que nossa formação não é na área de ciências da saúde.

3.4.1. Mecanismos básicos de interação entre campos elétricos e magnéticos e organismos vivos

Campos magnéticos variáveis no tempo geram correntes ou provocam o movimento de íons através do campo elétrico induzido. Este é o mais estudado mecanismo de interação entre materiais orgânicos e campos magnéticos (Barnes, 1990). Outro mecanismo é através das Forças de Lorentz (Cristea, 1994). Um terceiro mecanismo é a indução de correntes em função de campos elétricos gerados por linhas de transmissão.

3.4.1.1. Correntes elétricas geradas pela variação de indução magnética

Para apresentar o primeiro caso, inicia-se com a equação de Maxwell na forma integral que relaciona a indução magnética variante no tempo, \vec{B} , com o campo elétrico induzido, \vec{E} .

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3.2)$$

E a relação constitutiva (1.19c)

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Para uma indução magnética variável no tempo e constante na superfície de integração

$$\vec{E} = \frac{s}{l} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

e

$$\vec{J} = \sigma \cdot \frac{s}{l} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.4)$$

Um homem pode ser representado como um cilindro de 1.7 m de altura e raio de 0.2 m, com condutividade elétrica corporal média interna de $\sigma = 0.5 \text{ S.m}^{-1}$. Exposto tanto a uma indução magnética na direção vertical como na direção horizontal de 10^{-7} T , de frequência de 60 Hz, Vide figura 3.4 (Barnes, 1990), a máxima densidade de corrente induzida, J , é de aproximadamente $3 \cdot 10^{-6} \text{ A.m}^{-2}$.

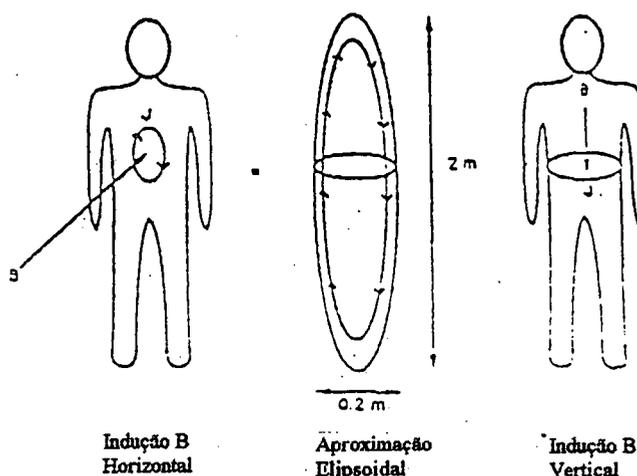


Figura 3.4 Indução magnética fluindo através do corpo humano (Barnes. 1990).

Na realidade, a distribuição volumétrica das condutâncias no corpo é altamente não-homôgenea e espera-se que as correntes sigam caminhos de alta condutância, tais como vasos sanguíneos e excluam ossos e regiões adiposas, ver TABELA 3.4 (Polk e Postow, 1986). Adicionalmente, a condutividade dos músculos é assimétrica e varia de 0.08 a 0.6 S.m^{-1} de acordo com a orientação (Epstein e Foster, 1983) e, conseqüentemente, a densidade de corrente varia rapidamente com a posição do corpo e a direção do campo.

TABELA3.4 -Valores típicos de condutividades biológicas

Orgão	Condutividade (S.m ⁻¹)
Sangue	0.67
Pulmão	0.05
Fígado	.14
Gordura	.04
Osso	0.01
Fluido Celular	0.5
Membrana celular	10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁷

3.4.1.2. Correntes elétricas induzidas por campos elétricos

Para conhecer possíveis efeitos de campos elétricos no organismo humano é necessário calcular a intensidade da densidade de corrente induzida por linhas de transmissão.

A densidade de corrente induzida dentro do corpo humano é dada por:

$$\vec{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \quad (3.4)$$

E a corrente total induzida no corpo humano pode ser obtida integrando-se a densidade de corrente na sua superfície:

$$I_t = \omega\epsilon_o \int E_s ds \quad (3.5)$$

onde, conforme a figura 3.5 (Chiba et. al., 1984)

E_s - campo elétrico superficial local, em V.m⁻¹ ;

ds - área infinitesimal onde se aplica o campo E_s , em m².

É bem conhecido que a intensidade do campo aumenta grandemente nas superfícies das saliências superiores de um objeto condutor (Deno,1977), como se observa na figura 3.5, onde, na cabeça, o campo é aumentado em até 18.3 vezes para a altura de um modelo de corpo humano de 1.8 metros. A figura 3.5 é um modelo axissimétrico do corpo humano usado para o cálculo, através do método de elementos finitos, de densidades de corrente e campo elétrico dentro do corpo humano e da corrente total induzida (Chiba et. al., 1984).

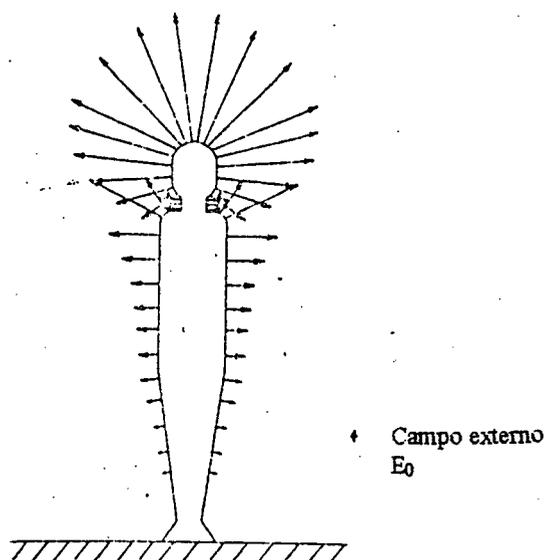


Figura 3.5 Intensidade de campo elétrico na superfície de um modelo humano

Outra maneira de representar a corrente total induzida em um modelo aterrado na posição ereta é através da expressão

$$I_t = J_g A \quad (3.6)$$

onde

J_g - A densidade de corrente média na superfície aterrada do modelo, ou seja, a sola dos pés ($A.m^{-2}$);

A - Área da sola dos pés (m^2).

3.4.1.3. Movimento de ímãs permanentes

O campo magnético pode afetar as microestruturas ferromagnéticas que os organismos vivos contém, especialmente no núcleo da hemoglobina, as quais, em um campo exterior, são supostas em par e sujeitas a uma força. Estas ações motoras diretas provocam uma troca de energia entre estas microestruturas e pressões mecânicas sobre tecidos circundantes, com variação alternada ao longo do tempo. Tais ações afetam, por exemplo, seriamente o sentido de orientação de alguns pássaros ou insetos ou bactérias magnetotéteis que contém cristais de magnetita (Cristea, 1994).

Em 1992, Joseph Kirschvink de Caltech, anunciou a separação de cristais de magnetita dos tecidos do cérebro humano e afirmava: "Há magnetita nos tecidos do cérebro humano e é possível que sua presença determine alguns dos efeitos dos campos

eletromagnéticos sobre a saúde, porém, não se conhece a maneira de atuação dos campos sobre a saúde". As dimensões dos cristais estão entre 10 e 70 nm, com alguns chegando a 200 nm. A concentração média é de 4 ng de magnetita (em torno de 5 milhões de cristais) por 1 g de tecido cerebral, com valores superiores na membrana meningeal, de 70 ng (100 milhões de cristais) por grama.

3.4.1.4. Força de Lorentz

Um terceiro mecanismo é a força de Lorentz (Halliday e Resnick, 1976)

$$\vec{F} = q_0 \vec{E} + q_0 \vec{v} \times \vec{B} \quad (3.17)$$

onde

q_0 é a carga dos íons (C);

\vec{v} a velocidade do íon (m.s⁻¹).

Esta força atua sobre íons solúveis do fluxo sanguíneo ou do fluxo transmembrânico, especialmente nos processos nervosos.

A apresentação destes mecanismos de interação visa dar uma idéia dos fenômenos de acoplamentos entre os campos elétricos e magnéticos e os organismos vivos, fornecendo um ponto de partida para trabalhos posteriores. Particularmente, a indução de correntes por campos elétricos é de interesse devido aos cálculos já apresentados de campos elétricos gerados por linhas de transmissão. Assim, o cálculo de correntes induzidas por campo elétrico representa um avanço no presente trabalho.

3.4.2. Fontes de campos magnéticos

Há um grande número de fontes de campos magnéticos AC em nosso meio ambiente. Durante um dia, uma pessoa é exposta a campos gerados por correntes na fiação elétrica da casa, aparelhos elétricos, motores, computadores, linhas de distribuição, como também de campos gerados por fenômenos atmosféricos. A indução magnética DC da Terra está em cerca de $5 \cdot 10^{-5}$ T, enquanto que os campos gerados em 60 Hz pela atmosfera estão abaixo de 10^{-12} T. Eletrodomésticos geram induções magnéticas apresentados na TABELA 3.5 (Barnes, 1990). Deve ser ressaltado que os campos da maioria destes eletrodomésticos decaem muito rapidamente com a distância e a exposição a estes campos é normalmente por curtos períodos. Duas exceções são os cobertores

elétricos e camas d'água onde as bobinas de aquecimento são ligadas periodicamente e as exposições são por horas.

TABELA 3.5- Indução magnética (limites de valores de 3 a 5 modelos) em 60 Hz para várias proximidades de aparelhos (Barnes, 1990)

Aparelho	Indução magnética (μT) em		
	$z = 3 \text{ cm}$	$z = 30 \text{ cm}$	$z = 1 \text{ m}$
Fogão Elétrico (acima de 10 KW)	6-200	0.35-4	0.01-0.1
Fornos de microondas	75-200	4-8	0.25-0.6
Limpadores a vácuo	200-800	2-20	0.13-2
Secador de cabelo	6-2000	< 0.01-7	< 0.01-0.3
Barbeador Elétrico	15-1500	0.08-9	< 0.01-0.3
Televisão	2.5-50	0.04-2	< 0.01-0.15
Suporte de lâmpadas fluorescentes	15-200	0.2-4	0.01-0.3
Serra Circular e Sabre	250-1000	1-25	0.01-1

Valores típicos de induções magnéticas geradas por linhas de transmissão em função da distância são fornecidos pela figura 3.8 para três fontes comuns de campos magnéticos na frequência industrial. As bandas representam variações dentro de fontes individuais de cada grupo (Barnes, 1990). Os campos destas linhas variam com as curvas de carga do sistema e flutuam com a hora do dia e o período do ano. Note-se que muitas poucas pessoas moram perto de linhas de transmissão de alta tensão, que são as mais visíveis e atraem a maior atenção. Fica-se exposto muito mais tempo a induções geradas por linhas de distribuição, onde os campos são maiores, que alimentam casas e empresas comerciais e industriais. Estas são parcela dominante de exposição a campos de linhas de transmissão

Outra fonte de indução magnética é a fiação das casas ou prédios. Estas induções magnéticas dependem tanto da intensidade da corrente como da distribuição da fiação. As induções magnéticas das fiações da casa são reduzidas se os fios estão dentro de um eletroduto de ferro doce (Barnes et al., 1989).

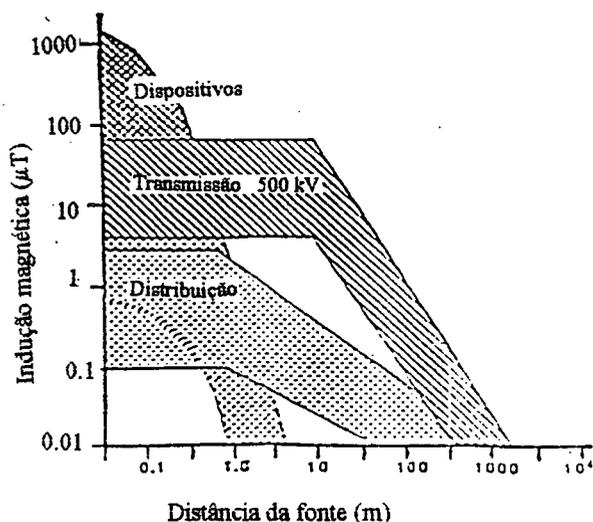


Figura 3.6 Indução magnética ao nível do solo com a distância horizontal, para três fontes de campos magnéticos na frequência industrial (Barnes, 1990)

Para uma casa típica em Denver, Colorado, as induções magnéticas são, em média, de $6 \cdot 10^{-8}$ T, sendo medidos valores variando de cerca de 10^{-8} até 10^{-6} T. Estes variam aproximadamente por um fator de dois durante o dia e, possivelmente, por outro fator de 2 com a estação do ano em qualquer casa. Durante um dia típico, uma pessoa pode esperar ser exposta a uma indução de até 10^{-5} T por caminhar próximo a motor, aparelhos eletrodomésticos, um transformador ou sob uma linha de transmissão. A correspondente densidade de corrente induzida em uma pessoa em casa é, em média, de cerca de $2 \cdot 10^{-6}$ A.m⁻² e tem valor máximo de até cerca de $2 \cdot 10^{-4}$ A.m⁻². Colocando em perspectiva, as densidades de corrente DC associadas com o crescimento das células está na ordem de 10^{-2} A.m⁻² ou um fator de 100 a 10000 vezes maior que as correntes induzidas pelo sistema de distribuição de energia. O corpo humano também é exposto a correntes elétricas variantes no tempo que são gerados pelos nervos e pela contração de músculos. Estes sinais estendem a regiões ao redor das células nervosas (Barnes, 1990). As densidades de corrente adjacentes à célula estão na ordem de 1 a 10 A.m⁻². Estes campos decaem rapidamente com a distância do nervo, mas, ao se somarem, eles geram um fundo de atividade elétrica no corpo. Sinais deste tipo são usados para avaliar o estado do coração (ECG - Eletrocardiograma) e o cérebro (EEG - Eletroencefalograma). A importância destes sinais para o funcionamento de outras células distantes não é ainda compreendido, contudo se acredita que o sinal EEG poderia servir como um sinal sincronizante no cérebro (Adey, 1985).

3.4.3. Efeitos biológicos de campos elétricos e magnéticos de extrema baixa frequência

Os informes provenientes da ex-União Soviética e outros países do Leste Europeu, na década de 70, acerca das enfermidades afetando o pessoal de operação de instalações elétricas de alta tensão, 500 e 750 KV, de frequência industrial, iniciaram o debate sobre efeitos dos campos de extrema baixa frequência (ELF, em inglês) sobre a saúde humana. Na França, Suécia, Inglaterra e EUA se desenvolveram na mesma época estudos sobre o impacto ambiental das linhas de extra alta tensão.

Se criou um conjunto de preocupações reunindo eletricistas, biólogos, médicos, entre outros pesquisadores, para estudar os efeitos sobre a saúde humana da radiação eletromagnética ELF produzida por instalações de alta potência, cobrindo uma faixa de frequência entre 30 e 300 Hz.

A presença contínua de campos, na frequência industrial, no ambiente moderno, transforma potenciais riscos à saúde em matéria de sério interesse científico e de política de saúde pública. O interesse concentrou-se no câncer, especialmente leucemia e tumores cerebrais, no desenvolvimento de anomalias e, em menor extensão, em desordens no sistema endócrino e nervoso, incluindo depressão crônica.

3.4.3.1. Associação com o câncer

Estudos epidemiológicos envolvem o estudo de padrões de doença em populações expostas ao agente de interesse. Dois planos básicos de estudo têm sido usados nos trabalhos referentes a campos: 1) Estudo retrospectivo de caso-controle, comparando uma população de casos existentes - um grupo de pessoas com a doença - com um grupo de controle, as pessoas sem a doença, selecionado por ser similar em todas as outras características. Exposições passadas ao agente suspeito são comparadas nos dois grupos e relacionados com a incidência da doença. 2) O segundo tipo calcula a taxa de mortalidade (ou incidência) proporcional, a qual compara a mortalidade (ou incidência) da doença na amostra da população pesquisada com aquela no público geral. Ambos os planos envolvem problemas e influências que deverão ser descartadas antes que qualquer associação seja feita entre o risco à saúde e a exposição. Estudos epidemiológicos podem somente demonstrar associação.

Um obstáculo para o estudo da influência dos campos eletromagnéticos aparece com a dificuldade de se encontrar ambientes com pouca exposição a campos.

Em estudos ocupacionais, outras exposições, tais como químicas, presentes no local de trabalho confundem os resultados. O ponto a notar é que a tendência total é uma

taxa de risco maior que 1, apesar de apenas levemente, para uma associação entre campo-câncer.

De cinco estudos nos Estados Unidos para a correlação entre câncer em crianças e exposição a campos, um não encontrou nenhum aumento na incidência de câncer e em outros quatro, cada um envolvendo mais de 350 casos de câncer, a taxa de risco variava entre 1.4 (para todos tipos de câncer) e 3.7 para tumores no sistema nervoso central.

Numerosos estudos examinaram a questão entre o câncer e a exposição a campos ELF em adultos, especialmente àqueles com maior exposição que o resto da população devido às suas ocupações. Apesar da leucemia ser a mais examinada, a associação com tumores cerebrais é a mais estreita. No todo, os estudos indicam uma fraca, porém definitiva associação entre ocupações mais expostas a câncer no cérebro.

Doze estudos americanos examinaram a questão da exposição ocupacional a campos ELF e leucemia. Todos eles mostraram um aumento do risco de leucemia de 1.4 a 3.2 quando todos os tipos de leucemia são considerados.

A pesquisa mais extensa ocorre com os trabalhadores em telefonia de Nova Iorque, trabalho conduzido por Genevieve Matanoski e colaboradores da Universidade John Hopkins, envolvendo 50 582 empregados homens com uma idade média de 40 anos. Ela mostra um risco maior de leucemia para jovens trabalhadores que continuam na companhia telefônica. Particularmente, emendadores de cabo - o grupo com mais alta exposição - mostrou a mais alta incidência de câncer, tanto para leucemia (7 vezes mais do que para quem não trabalha em linhas) como para todos os tipos de câncer, incluindo aqueles do sistema gastrointestinal, próstata e cérebro.

De outros 8 estudos ocupacionais - dois na Grã-Bretanha, um na Nova Zelândia e cinco na Suíça - dois estudos suíços não encontraram nenhuma associação significativa entre leucemia e exposição a campos, enquanto que os outros mostraram uma associação com taxas de risco entre 1.3 e 3.8.

Onze estudos procuram ligar tumores cerebrais e exposição a campos ELF, cinco fazem parte de pesquisas já citadas e outras se restringem a questão do câncer no cérebro e exposição ocupacional nos Estados Unidos. Todas mostraram risco relativo variando de 1.5 a 8. Dois associaram um risco crescente com a maior probabilidade de exposição ao campo baseado no tipo de trabalho. Já dos cinco estudos ocupacionais feitos na Suécia (quatro deles relativos a incidência de câncer em eletricitários e um examinando a distribuição ocupacional em 4000 tumores cerebrais) não encontrou nenhum risco excessivo para o sistema nervoso central (SNC) ou câncer no cérebro em ocupações elétricas.

Apesar dos dados que indicam uma certa associação entre câncer no cérebro com exposições a campos ELF, a mesma não necessariamente indica uma relação rigorosa de

causa-efeito porque existem outros agentes atuando concomitantemente, mesmo que os campos elétricos possam aumentar a ação de outros agentes cancerígenos.

Teorias correntes de carcinogênese defendem que a formação de tumores envolve ao menos dois estágios chamados iniciação e promoção. Na iniciação, o ácido desoxirribonucleico (DNA) no núcleo celular é rompido por um agente externo, produzindo DNA anormal que leva a formação de proteínas anormais e, finalmente, a disfunções celulares. Iniciação requer considerável energia para quebrar as ligações químicas do DNA- mais do que é disponível nos campos ELF de interesse.

Na promoção, o período de latência entre a exposição ao agente cancerígeno e a manifestação do câncer indica que o dano não poderia se expressar como um tumor, a menos que outro processo de promoção acontecesse, dando à célula transformada uma vantagem de crescimento. Deste modo, se campos ELF afetam o câncer, eles podem atuar como promotores. Isto pode ser seletivo pelo tipo de câncer ou o processo geral levando a um crescimento do câncer mais rápido.

3.4.3.2. Alterações no ritmo circadiano

O efeito demonstrado inequivocamente de campos de baixa frequência envolve mudanças no relógio interno biológico ou ritmo circadiano (Indira e Morgan, 1990). Estes são melhor refletidos nos padrões de secreção da melatonina pineal, que é secretado pela minúscula glândula pineal no cérebro. Por ser um transdutor neuroendócrino, ela translada um sinal elétrico de uma célula numa secreção hormonal (ou endócrina).

Em mamíferos, a luz, ao entrar nos olhos, produz o sinal que inicia o ciclo da melatonina pineal. Esta é a base de um dos principais sistemas temporais do corpo que nas pessoas é responsável pelo ciclo sono-consciência. Deslocamentos de fase neste ciclo mudam relações de fase internas entre vários ritmos circadianos do corpo e causam algumas desordens psiquiátricas . Disfunções do sistema circadiano pode afetar, também, a realização de tarefas e a sensibilidade a drogas.

A glândula pineal e níveis de melatonina também ajudam a inibir o crescimento de, por exemplo, câncer na pele e certos tipos de câncer no seio de ratos. Esta ação tem sido encontrada durante a fase de promoção e não durante a fase de iniciação. Se exposição crônica a campos pode promover o câncer, poderia acontecer por suprimir a melatonina pineal.

Exposição crônica a campos de 60 Hz tem mostrado mudanças no tempo de reação em pessoas e primatas. Nenhuma mudança na maioria dos sinais vitais, parâmetros psicológicos e ânimo. Tempo de reação, memória, fadiga e habilidade na tomada de decisão também permanecem normais. Entretanto, quando o padrão de exposição é dado

de modo que haja uma comutação ligado e desligado a cada 15 segundos, o estado de alerta e o tempo de reação pioraram notavelmente. Alguns indivíduos se mostraram mais sensíveis que outros.

3.4.3.4. Estudo em células e órgãos

Estudos em laboratório são feitos em células "in vitro" individuais ou preparados de órgãos devido a complexa interação de sistemas vivos com campos, com a intenção de elucidar os mecanismos de atuação. Entre os experimentos conduzidos, estava um onde muitos fenômenos ao nível das células exibem "janelas" de frequência e amplitude. É um fenômeno que tem efeitos para determinados valores de frequência e amplitude, mas desaparecem quando ambos os valores são imediatamente acima ou abaixo. Por exemplo, o fluxo de cálcio ocorre na frequência de 60 Hz, mas não em 55 ou 65 Hz. Estas janelas poderão indicar tanto uma relação ressonante entre causa e efeito ou uma ação de algum mecanismo de filtragem na célula.

Também a enzima decarboxil ornitina (ODC) é influenciada por campos na frequência de 60 Hz. Ela está presente em todas as células e é essencial para o crescimento celular. Devido à atividade de crescimento excessiva em células cancerosas, o aumento da atividade da ODC é muitas vezes usado como um indicador de promoção do câncer. Contudo, agentes que aumentam a atividade da ODC não necessariamente promovem câncer.

Para células humanas com câncer linfático onde foi encontrado aumento na atividade da ODC quando sujeitos a campos de 60 Hz em um meio de 10 e 0.1 mV.cm⁻¹, mas não em campos de intensidade de 1.0 e 5.0 mV.cm⁻¹.

Um outro tipo de experimento com ODC mostrou que campos de poucos mV.cm⁻¹ duplicam ou triplicam o crescimento de células que já tinham sido aceleradas por um promotor químico de tumor.

Estes experimentos sugerem que a exposição a campos promoveria o câncer, sendo o efeito dependente do tipo de célula. Enquanto que o efeito poderia ser relacionado com os ciclos temporais normais das células que variam de poucas horas até poucos dias, dependendo do tipo de célula. Por outro lado, ele poderia estar relacionado com mais complexos laços de realimentação bioquímicos.

Apesar de campos de 60 Hz, na ordem de 10⁻⁷ T, não poderem danificar o DNA, podem mudar a taxa de síntese de DNA em certas células humanas. Em certos tipos de células humanas foram encontradas mudanças na taxa e tipo de produção de proteínas, de acordo com experimentos de Abraham Liboff e colaboradores na Universidade Oakland. Este tipo de efeito também foi encontrado em um tipo de célula de insetos por Reba

Goodman e Ann Henderson na Universidade Columbia em Nova Iorque. Tal efeito foi visto num tipo de célula humana.

Sob a influência de campos, novas proteínas são formadas e os tamanhos das proteínas são modificados de modo a produzir moléculas mais curtas e um pouco menos longas. A natureza da mudança depende da frequência do campo. Desde que algumas são enzimas que controlam processos da célula, estas modificações poderiam acarretar efeitos nas operações das células expostas. Outras proteínas não se modificam quando expostas a campos.

Foi mostrado que campos ELF influenciam a ação do hormônio paratiróide, que afeta o crescimento e, entre outras coisas, alguns hormônios que intermediam resposta a tensões e atividades anti-inflamatórias.

3.5. Conclusões sobre os efeitos dos campos elétricos e magnéticos sobre o organismo humano

Apresentar-se-á conclusões sobre a passagem de correntes elétricas induzidas ou correntes de contato por curto espaço de tempo e, genericamente, o efeito de campos elétricos e magnéticos devido a exposição prolongada no organismo humano, ação devido, principalmente, a correntes induzidas.

3.5.1. Efeitos sensíveis a pessoas pela passagem de corrente ou por contato direto ou induzida

As correntes induzidas aumentam de intensidade de acordo com o nível de tensão da linha, o tamanho do objeto coletor de cargas e com o isolamento do objeto que descarrega a corrente. Se considera a intensidade de corrente de 1mA como o nível mínimo de percepção (IESA, 1987). Para corrente de libertação, onde a pessoa perde o controle da musculatura, se considera de 4.5 mA a corrente de libertação estimada para 0.5% das crianças, enquanto que para mesma proporção, 6mA para mulheres e 9mA para homens (Dalziel, 1956). 5 mA é o valor limite de corrente elétrica dentro do corpo humano estabelecido parte das companhias de energia elétrica (IESA, 1987; Delaplace e Reilly, 1978). Correntes de 15mA e 23 mA provocam dificuldades respiratórias em 50% das mulheres e homens, respectivamente (Dalziel, 1956). O nível de corrente de 35 mA é o valor estimado como a corrente de fibrilação durando 3s para 0.5% das crianças com 20 Kg; e correntes de 100 mA são estimados como a corrente de fibrilação durando 3s para 0.5% dos adultos com 70 Kg (Dalziel, 1970).

As correntes máximas induzidas permitidas são 5mA, valor muito abaixo da intensidade de corrente que pode provocar dificuldades respiratórias ou fibrilação ventricular.

3.5.2. Efeitos sobre o organismo humano dos campo ELF devido a exposições prolongadas

O atual conhecimento sobre os efeitos dos campos elétricos e magnéticos no organismo humano é fragmentado, não permitindo uma teoria coerente para explicar as observações. Se por um lado se conhece razoavelmente a formulação das interações entre os campos elétricos e magnéticos com os organismos vivos, se conhece pouco das repercursões de seus efeitos no organismo. E, a maior preocupação é a associação entre campos e o câncer. Por isso, vários grupos emitiram pareceres.

O informe do grupo de pesquisadores do CIGRE, reunido em Paris em 1990, apresentou, em sua conclusão, que não existem evidências persuasivas de que a exposição a campos eletromagnéticos ELF pode provocar o câncer e qualquer relação entre ambos é questionável (Grupo CIGRE, 1991). Conclusão semelhante expressa a Associação Internacional de Proteção a Radiação (IRPA), em 1990, de que estudos biológicos não determinam uma base para estabelecer os limites de exposição humana. Os padrões de IRPA são determinados em função de correntes induzidas por campos elétricos e magnéticos e alguns efeitos de contato (Cocoran, 1992).

Pesquisadores da Universidade Carnegie Mellon, em Pittsburgh, organizaram um informe para o "Office of Technology Assessment (OTA) of the U.S. Congress, que concluía: "Não se pode afirmar categoricamente que não existem riscos para a saúde devido a exposição crônica a campos eletromagnéticos. Porém, não há fundamentos para se declarar a existência de um risco significativo" (OTA, 1989). A agência de Proteção ao Meio Ambiente (EPA) dos EUA, avalia a exposição eletromagnética como "possível cancerígeno" (A terceira categoria de uma escala de cinco - Conhecido cancerígeno, provável cancerígeno, possível cancerígeno, não classificado como cancerígeno e sem evidências de canceriginidade).

A maior concentração de esforços para qualificar a ação dos campos eletromagnéticos se dá na sua associação com o câncer. Porém, existem outros efeitos encontrados na literatura especializada, que merecem ser considerados: Influências sobre o influxo nervoso; a alteração do fluxo de cálcio através da membrana; a alteração da secreção de melatonina pela glândula pineal, alterações do DNA, RNA e da síntese de proteínas que podem ser as causas dos distúrbios psíquicos, de visão, depressão, debilidade, cansaço e perda de cálcio (Indira e Morgan, 1990)

Se existem os alegados efeitos devidos a campos ELF, estes são sutis. A relação com o câncer, se houver, é muito pequena, apesar de para crianças, provocar o aumento de leucemia. Os efeitos parecem ser mais evidentes com relação aos distúrbios psíquicos, de vista, depressão, debilidade e cansaço. Nesta área deveria ser feito um estudo mais rigoroso, de como os campos ELF alteram o humor das pessoas. É um efeito mais sutil que o câncer, porém, talvez, de maior importância pela prolongada exposição a campos, das mais variadas intensidades e direções, que pessoas são submetidas diariamente.

Dentre os mecanismos de interação entre os campos e o organismo humano estudados, implementou-se, no EFCAD, o cálculo correntes das induzidas eletricamente. Com isto, pode-se ter idéia da distribuição de correntes, num modelo do corpo humano 2D, induzidas pelo campo elétrico gerado por linhas de transmissão.

CAPITULO 4 DENSIDADE DE CORRENTE INDUZIDA NO CORPO HUMANO

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados resultados de cálculos de campo elétrico e densidades de corrente pelo MEF dentro de um modelo axissimétrico do corpo humano, comparando estes valores com os fornecidos na literatura para um modelo axissimétrico, também calculados pelo MEF. São apresentados, também, resultados de campo elétrico e densidade de corrente em modelo bidimensional do corpo humano sob uma linha de transmissão de 500 kV.

4.2. A distribuição de campo elétrico e densidade de corrente num modelo humano

Com o aumento da tensão em linhas de transmissão, a tensão de 1500 KV já possui extensa pesquisa e a de 2000 KV sendo considerada nos Estados Unidos (Chiba et. al., 1984). Os efeitos da campo elétrico são de grande importância entre os problemas associados à elevação da tensão em linhas de transmissão. Estes efeitos são classificados em duas categorias: a) Estímulos elétricos devido a faiscamentos e contatos diretos, vistos no capítulo anterior e b) Correntes elétricas induzidas internamente, com a formulação apresentada no item 3.4.1.2.

O conhecimento de intensidades de campos internos ou densidades de correntes dentro do corpo humano é considerado essencial para analisar o efeito direto dos campos elétricos sobre pessoas (Chiba et. al, 1984).

Os campos elétricos internos e as densidades de corrente serão calculados através da formulação desenvolvida no capítulo 1 para o método de elementos finitos para problemas 2D e axissimétricos. Eis a grande força do método, que permite a fácil obtenção de campos e correntes em domínios que apresentem vários meios com condutividade e permissividade diferentes (Beasley et. al., 1979). É possível, através do método de simulação de cargas, calcular o campo elétrico em meios que possuam permissividade elétrica e resistividade volumétrica (Takuma et. al., 1981), mas a entrada de dados será muito mais demorada pela necessidade de se conhecer a posição de cada carga fictícia e dos pontos de contorno, normalmente acima de 100 pontos, bem como a resolução do conjunto de sistemas lineares que definem o problema (Takuma et. al., 1981).

4.2.1. Modelo Humano

O modelo humano utilizado para calcular o campo elétrico e as correntes induzidas neste trabalho é visto na figura 4.1, com as respectivas dimensões. Por se utilizar o EFR, que só aceita elementos retangulares, como modelador do corpo humano, as curvas do corpo não são representadas. Do corpo humano são representados a cabeça, o pescoço, o tórax, a cintura, a pélvis, as pernas, o tornozelo e os pés. O corpo humano, macroscopicamente, pode ser considerado um meio que possui determinados valores de condutividade e permissividades elétricas (Barnes, 1990). No presente estudo, foi considerado que a condutividade e permissividade são constantes ao longo de todo corpo e iguais as do cérebro, os seja, a condutividade de 0.047 S.m^{-1} e a permissividade de $10^6 \epsilon_0 \text{ F.m}^{-1}$ (Chiba et. al, 1984). Isto para efeito de simplificação, pois cada órgão tem suas próprias constantes, o que exigiria a representação dos diversos meios e uma malha melhor refinada, conseqüentemente.

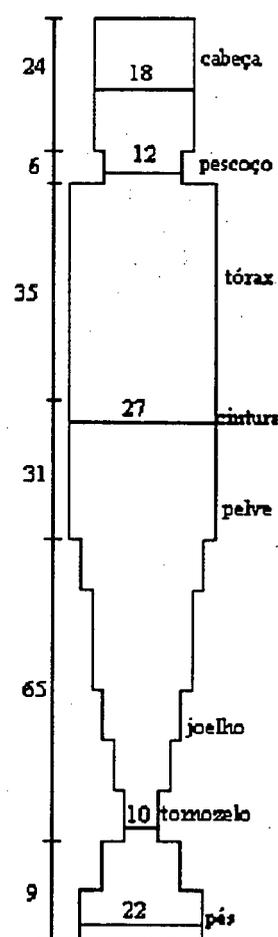


Figura 4.1 Representação do corpo humano, dimensões em cm.

4.2.2. Formulação para o cálculo da densidade de corrente em coordenadas cartesianas e cilíndricas.

Apresenta-se a formulação para o cálculo da densidade de corrente em meios que possuam permissividade e condutividade elétrica para casos 2D e axissimétricos. Para o caso axissimétrico, não há variação de grandezas na direção θ , garantindo-se apenas a utilização das componentes nas direções r e z para o cálculo do campo elétrico (Bastos, 1992).

Para o caso bidimensional, decompondo-se o campo elétrico nos eixos x e y , (1.64) e (1.65) e cada componente em suas partes real e imaginária, (1.60), (1.61), (1.62) e (1.63) e substituindo em (3.4), tem-se:

$$\vec{J} = (\sigma + j\omega\varepsilon)((E_{xr} + jE_{xi})\vec{i} + (E_{yr} + jE_{yi})\vec{j}) \quad (4.1)$$

Para o caso axissimétrico, decompondo-se o campo elétrico nos eixos r e z , (1.64a) e (1.65a), e cada componente em suas partes real e imaginária, (1.60a), (1.61a), (1.62a) e (1.63a) e substituindo-se em 3.4, tem-se:

$$\vec{J} = (\sigma + j\omega\varepsilon)((E_{rr} + jE_{ri})\vec{r} + (E_{zr} + jE_{zi})\vec{z}) \quad (4.1a)$$

Representando a densidade de corrente em suas componentes em x e y

$$\vec{J} = J_x\vec{i} + J_y\vec{j} \quad (4.2)$$

ou

$$\vec{J} = (J_{xr} + jJ_{xi})\vec{i} + (J_{yr} + jJ_{yi})\vec{j} \quad (4.3)$$

E representando a densidade de corrente em suas componentes em r e z :

$$\vec{J} = (J_{rr} + jJ_{ri})\vec{r} + (J_{zr} + jJ_{zi})\vec{z}$$

O que corresponde para coordenadas cartesianas e cilíndricas a:

$$J_{xr} = \sigma E_{xr} - \omega\varepsilon E_{xi} \quad (4.4)$$

$$J_{rr} = \sigma E_{rr} - \omega\varepsilon E_{ri} \quad (4.4a)$$

$$J_{xi} = \sigma E_{xi} + \omega \varepsilon E_{xr} \quad (4.5)$$

$$J_{ri} = \sigma E_{ri} + \omega \varepsilon E_{rr} \quad (4.5a)$$

$$J_{yr} = \sigma E_{yr} - \omega \varepsilon E_{yi} \quad (4.6)$$

$$J_{zr} = \sigma E_{zr} - \omega \varepsilon E_{zi} \quad (4.6a)$$

$$J_{yi} = \sigma E_{yi} + \omega \varepsilon E_{yr} \quad (4.7)$$

$$J_{zi} = \sigma E_{zi} + \omega \varepsilon E_{zr} \quad (4.7a)$$

com

$J_{*,r}$ - Parte real da componente x e y cartesiana e r e z cilíndrica da densidade corrente;

$J_{*,i}$ - Parte imaginária da componente x e y cartesiana e r e z cilíndrica da densidade corrente.

E a resultante da densidade de campo é representada por:

1) Em coordenadas cartesianas:

$$|\vec{j}| = \sqrt{|j_x|^2 + |j_y|^2} \quad (4.8)$$

A inferência de (4.3) em (4.2) permite representar

$$J = \sqrt{J_{xr}^2 + J_{xi}^2 + J_{yr}^2 + J_{yi}^2} \quad (4.9)$$

2) Em coordenadas cilíndricas:

$$|\vec{j}| = \sqrt{|j_r|^2 + |j_z|^2} \quad (4.10)$$

A inferência de (4.3a) em (4.2a) permite representar

$$J = \sqrt{J_{xr}^2 + J_{xi}^2 + J_{yr}^2 + J_{yi}^2} \quad (4.11)$$

Se o valor do campo é eficaz, também o é a densidade de corrente.

4.2.3. Domínio de análise axissimétrico

Neste domínio, considera-se eletrodos como placas planas nas quais são impostas condições de contorno de Dirichlet de potencial de 4 KV e 0 V para representar o solo, como se vê na figura 4.2, com o desenho não estando escala. O eixo de simetria Oz encontra-se na horizontal. O modelo humano é aterrado. Apesar de se impor potenciais reais, a formulação utilizada é a fornecida no capítulo 1, para o cálculo do potencial escalar elétrico complexo. A mesma é aplicada para comparação entre valores de campo elétrico e densidade de corrente calculados em nosso trabalho, para casos axissimétricos, com valores de campo elétrico e densidade de corrente fornecidos, na literatura, para um modelo com simetria axial (Chiba et. al., 1984).

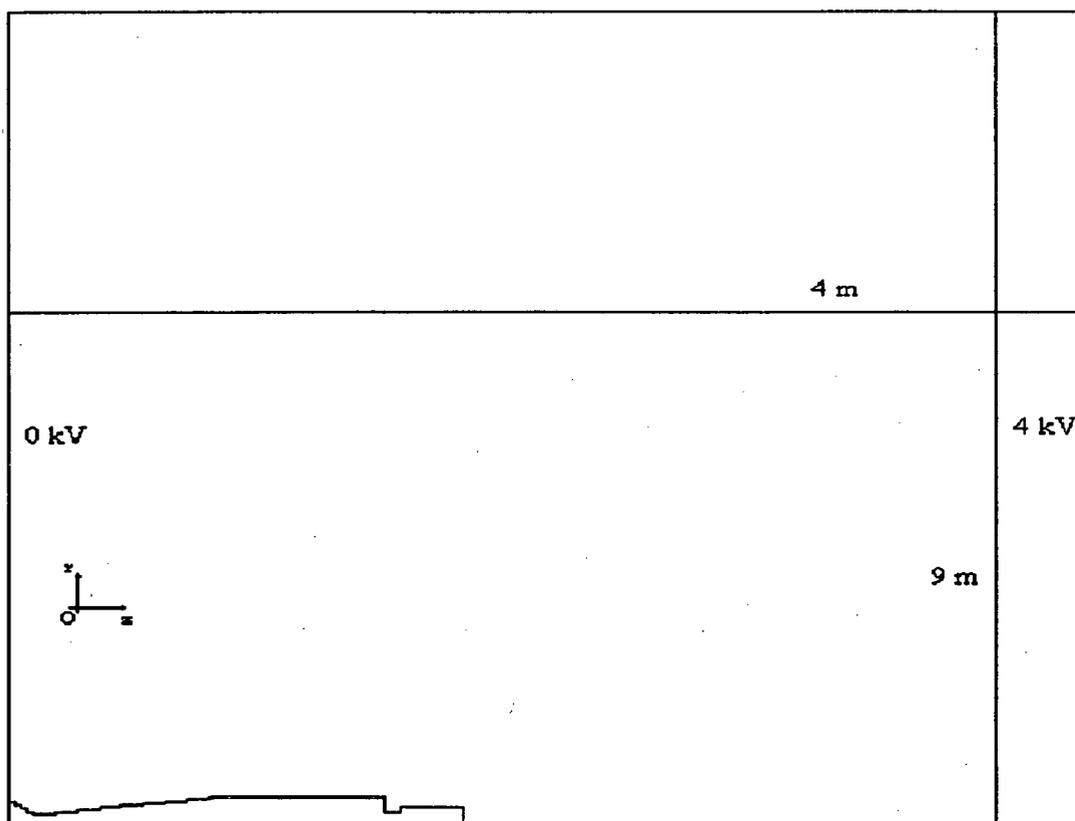


Figura 4.2 Domínio de análise axissimétrico, com dimensões em metros

A figura 4.3 apresenta a malha do domínio analisado com 960 elementos e 1023 nós, com uma malha mais densa sobre o modelo do corpo humano. Na malha são impostos potenciais reais de 4 kV e 0 V, como na figura 4.2, e no restante do domínio são aplicadas condições de contorno de Neumann. São inseridas características de material de condutividade e permissividade elétricas de acordo com o modelo apresentado no item 4.2.1

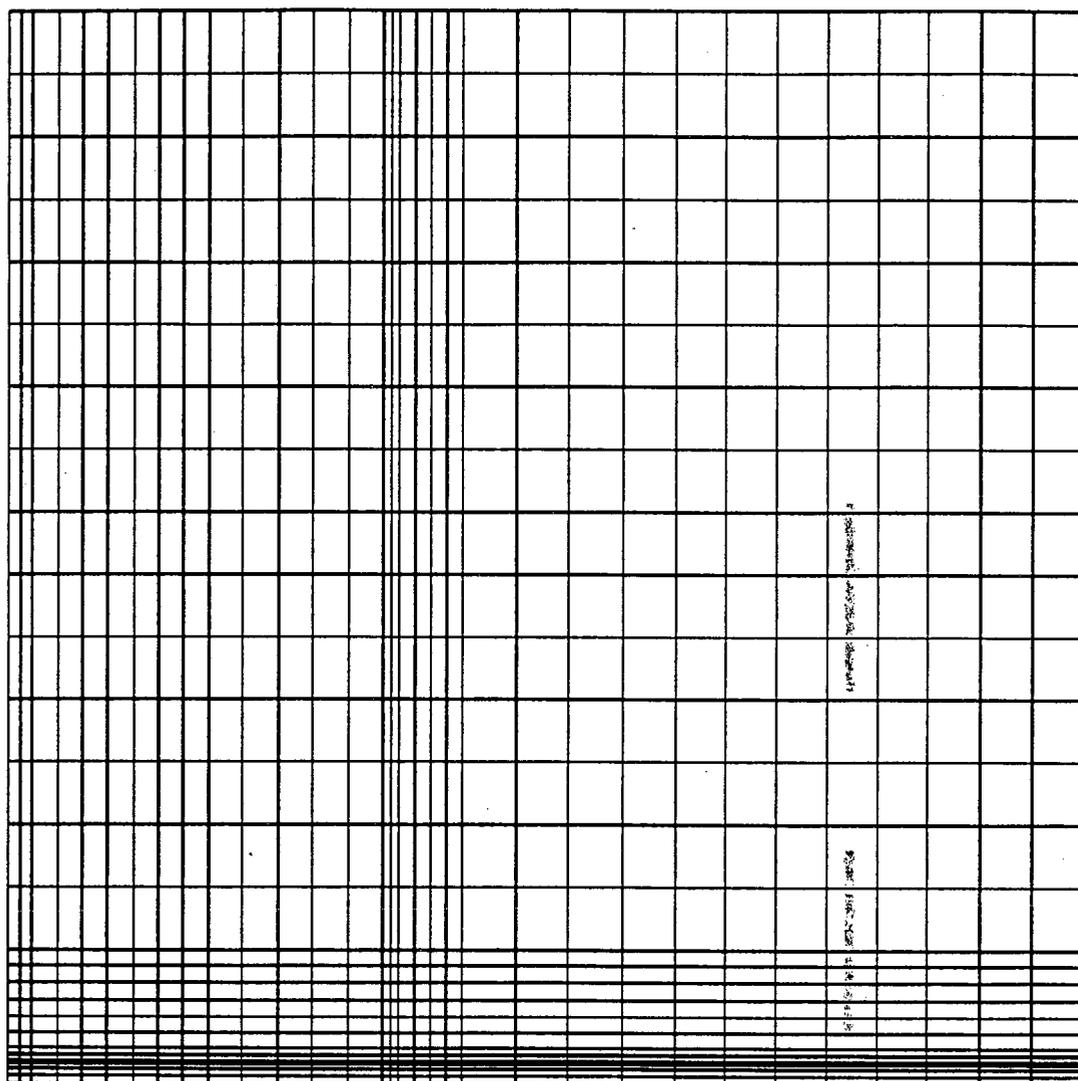


Figura 4.3 Malha do domínio com 1023 nós e 960 elementos.

No domínio haveria um campo constante de 1 KV.m^{-1} se não houvesse o modelo humano. Com sua existência no domínio, há modificações nas curvas equipotenciais, que são calculadas pelo módulo do potencial escalar elétrico complexo, como mostrado na figura 4.4, e conseqüentemente na distribuição de campo. São apresentadas 8 curvas equipotenciais para os seguintes valores (V): 50,100, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 e 3500. O corpo humano eleva o terra virtual, ou seja, eleva as curvas equipotenciais. Se nota que a alteração maior é nas imediações do modelo do corpo

humano. E as curvas equipotenciais dão uma idéia da distribuição do campo elétrico no domínio.

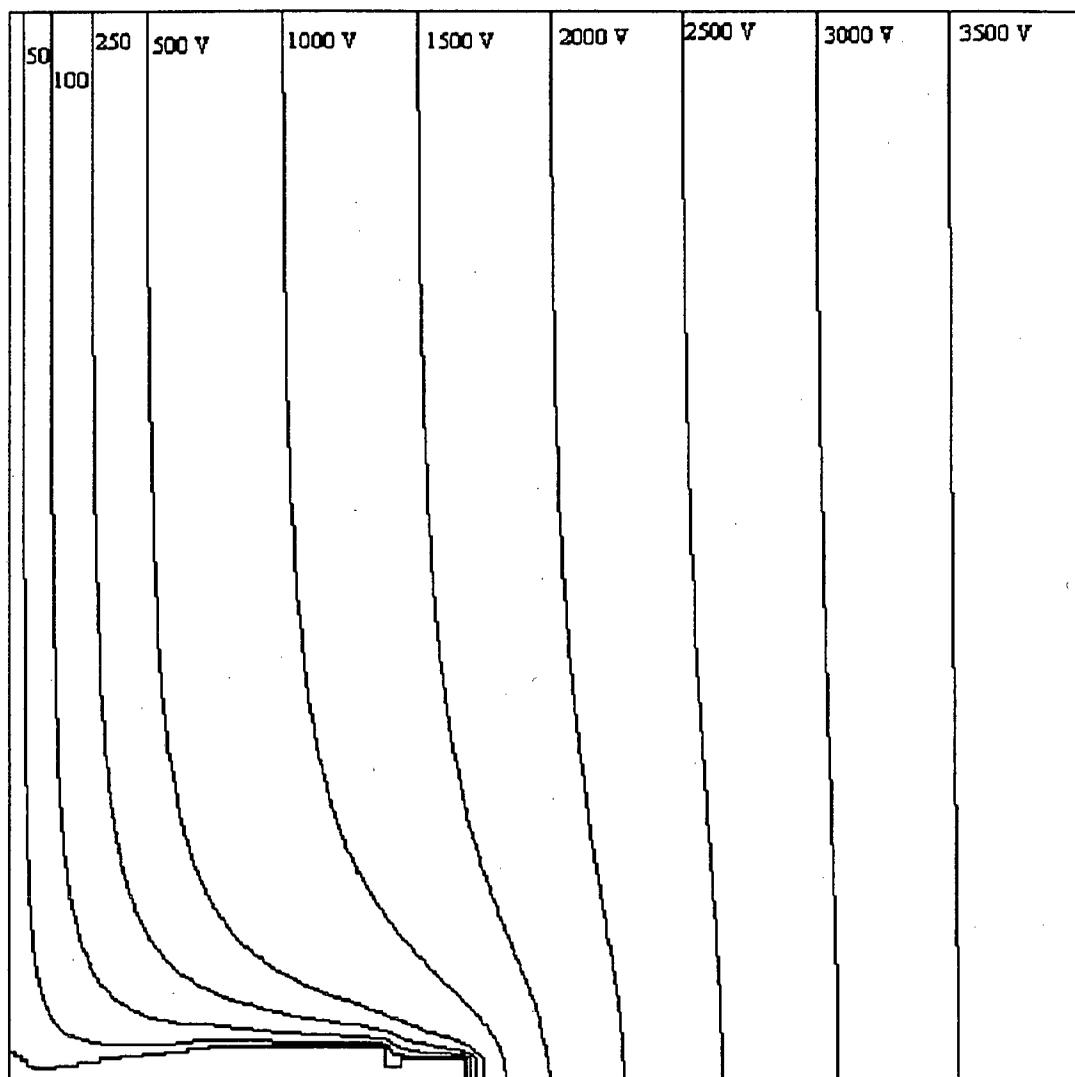


Figura 4.4 Curvas equipotenciais no domínio com a presença do modelo do corpo humano.

4.2.4 Relações entre a distribuição de campo elétrico e a densidade média de corrente com a altura do modelo humano

O domínio exposto no item 4.2.3. foi escolhido de modo a que se pudesse comparar valores de campo elétrico e densidade de corrente no interior do modelo axissimétrico do corpo humano calculado através do EFCAD com valores obtidos na literatura (Chiba et. al., 1984). Ambos os cálculos são através do MEF, com formulação

axissimétrica para fornecerem valores de campos e densidades de corrente, permitindo uma comparação mais precisa do modelo do corpo humano retangular apresentado na fig. 4.1. O modelo do corpo humano na literatura (Chiba et. al., 1984) apresenta curvas que procuram descrever os contornos do corpo.

4.2.4.1. Campo elétrico no modelo axissimétrico da literatura (Chiba et. al., 1984)

A figura 4.5 apresenta o campo elétrico médio, no modelo de um corpo humano, ao longo de um eixo que vai do topo da cabeça até os pés. O modelo tem 1.70 m de altura e simetria axial. Na figura 4.5, o campo elétrico está no eixo das abscissas e a altura, no eixo das ordenadas. O campo médio é obtido pelo somatório dos campos elétricos numa secção transversal do modelo, nos diferentes elementos, dividido pelo número de elementos da secção. Percebe-se que o campo é maior nas regiões mais estreitas, como o pescoço e o tornozelo

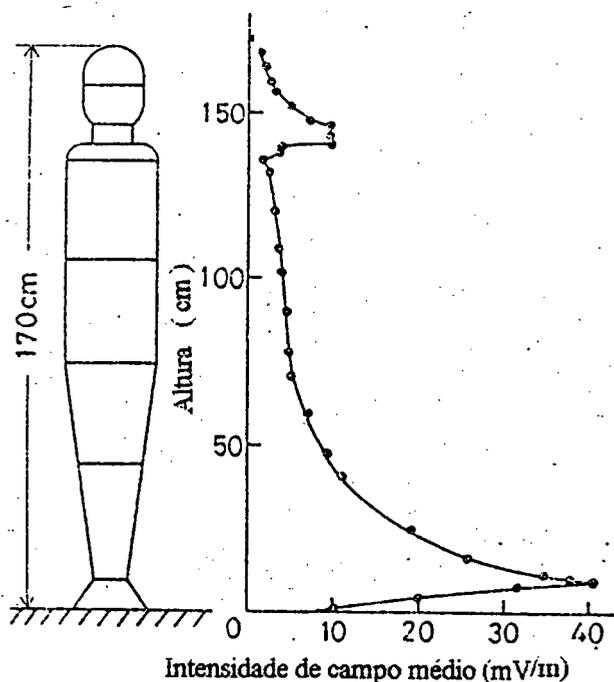


Figura 4.5 Campo elétrico médio dentro do modelo de um corpo calculado através de MEF fornecido na referência (Chiba et. al., 1984).

4.2.4.2. Campo elétrico no modelo axissimétrico retangular

A figura 4.6 apresenta o campo elétrico no modelo de um corpo humano ao longo de um eixo que vai dos pés ao topo da cabeça, representado no eixo das ordenadas e a altura, no eixo das abscissas. O modelo axissimétrico do corpo humano tem 1.70 m de altura. O campo elétrico eficaz é calculado pelo MEF através da expressão (1.68), aplicável a cada um dos elementos situados no eixo que vai dos pés até o topo da cabeça. O campo é mais intenso nas regiões mais estreitas como o pescoço e o tornozelo.

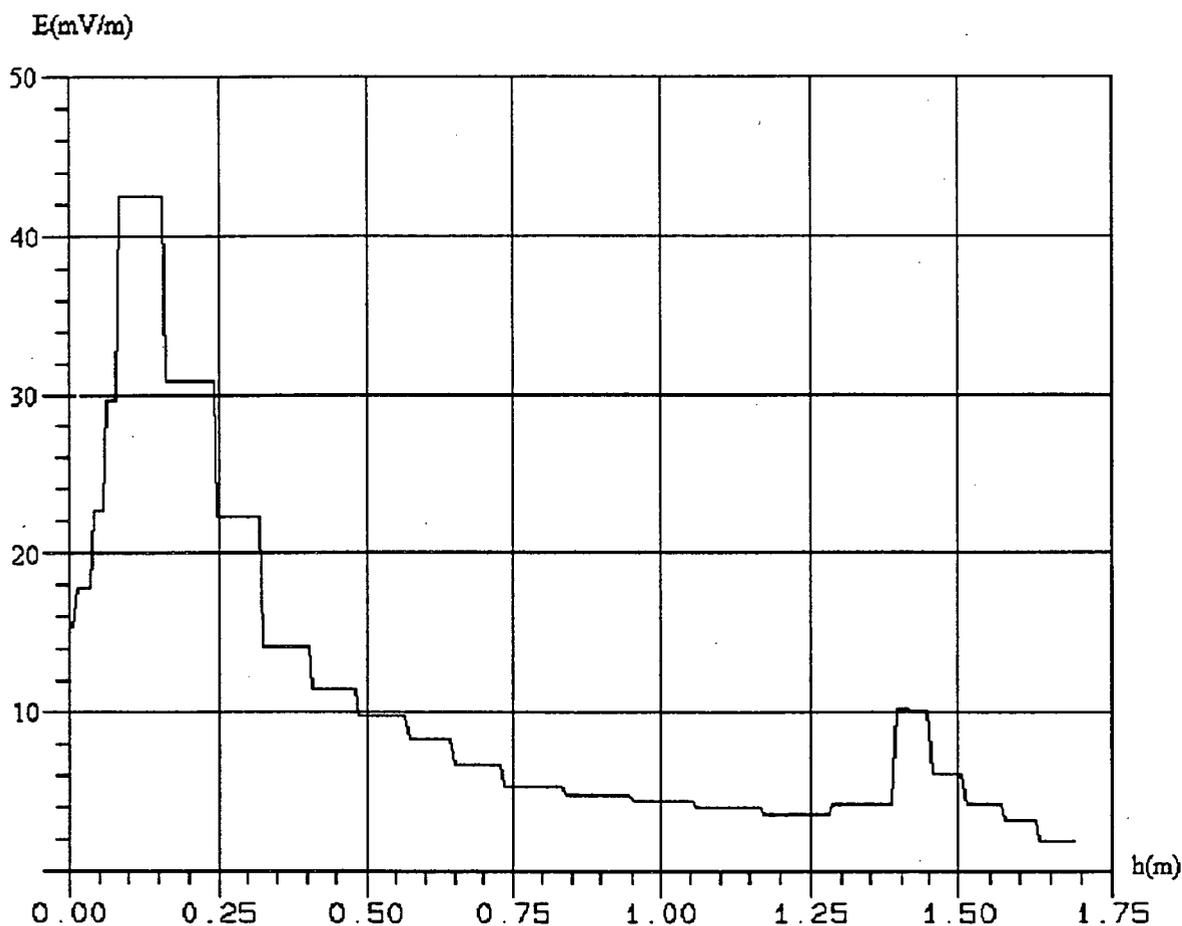


Figura 4.6 Campo elétrico dentro do modelo do corpo humano pela altura, h , do modelo humano, em metros.

4.2.4.3. Densidade de corrente no modelo axissimétrico da literatura (Chiba et. al., 1984)

Com a equação (4.9) é calculada, pelo MEF, a densidade média de corrente ao longo de um eixo que vai dos pés ao topo da cabeça em um modelo axissimétrico de 1.70 m de altura. A densidade de corrente está no eixo das abscissas e a altura no eixo das ordenadas. Como a densidade de corrente é proporcional ao campo, nas regiões mais estreitas, ela é maior.

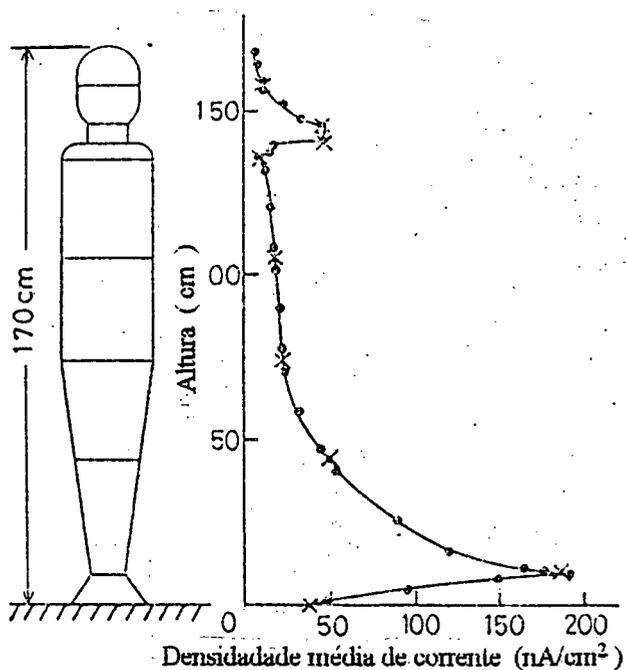


Figura 4.7. Densidade média de corrente elétrica calculada e experimental dentro do corpo fornecida na referência (Chiba et. al., 1984)

4.2.4.4. Densidade de corrente no modelo axissimétrico retangular

A partir da equação (4.9), a densidade de corrente ao longo de um eixo que vai dos pés ao topo da cabeça é calculada através do MEF para um modelo bidimensional do corpo humano de 1.70 m de altura. Na figura 4.8, a densidade de corrente está no eixo das abscissas. Do mesmo que no caso axissimétrico, a densidade de corrente, nas regiões mais estreitas, aumenta de intensidade.

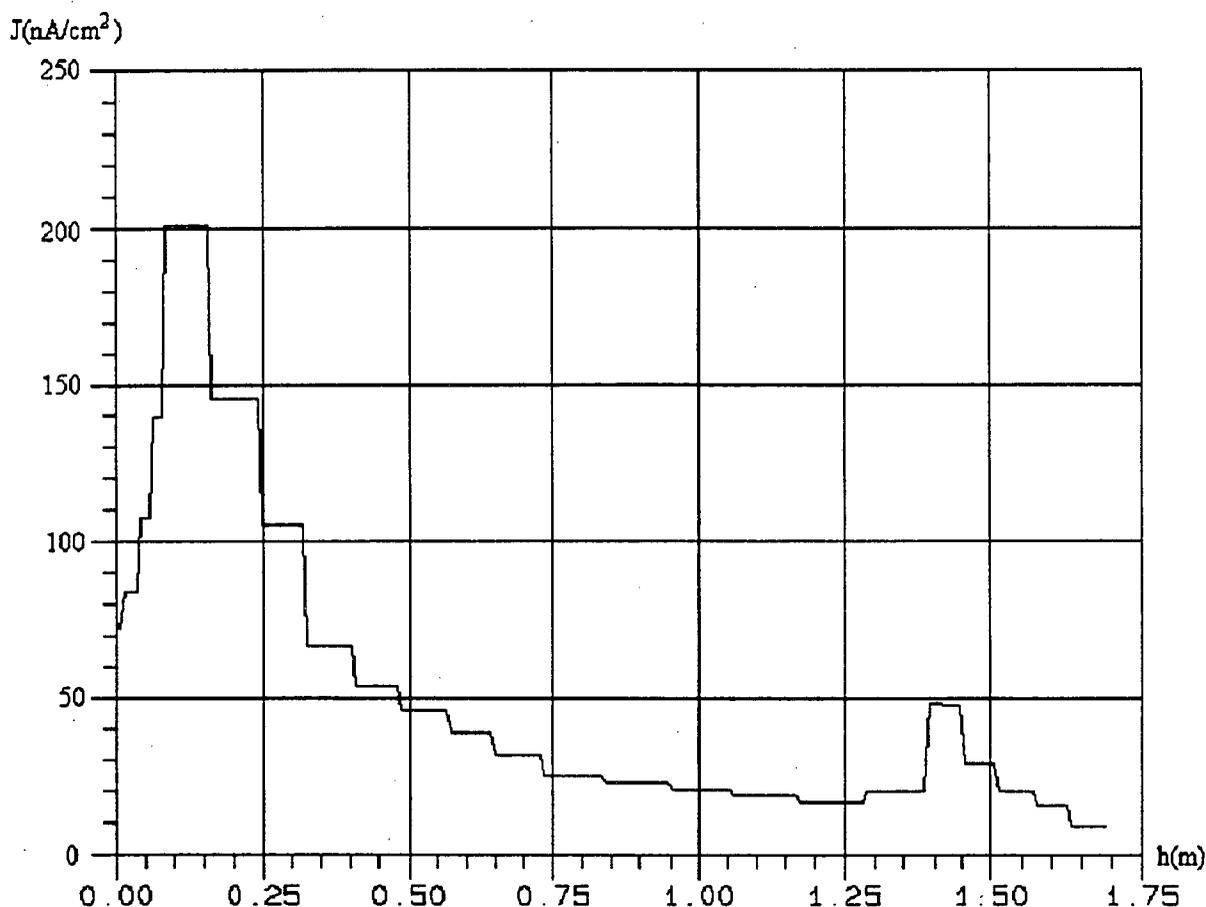


Figura 4.8 Densidade de corrente elétrica para o modelo 2D pela altura, h.

4.2.4.5. Distribuição de campo no domínio axissimétrico retangular

Como é conhecido, para objetos condutores localizados em um campo, os campos nas superfícies das protuberâncias superiores são grandemente aumentadas (Deno. 1977). Para o modelo humano axissimétrico apresentado na referência, o fator de aumento do campo elétrico no topo da cabeça é de 17.5 vezes, ou seja, o campo elétrico no topo da

cabeça é 17.5 vezes maior do que o campo que existiria sem a presença do corpo humano enquanto que, no presente modelo axissimétrico retangular, o fator de aumento alcançou 8.9 vezes, como foi calculado através do EFCAD.

4.3. Distribuição de campo elétrico e densidade de corrente num modelo humano sob uma linha de 500 kV

Serão apresentados o modelo de corpo humano de estudo, o domínio onde ele se encontra, a malha utilizada e as curvas de campo elétrico e densidade de corrente no seu interior.

4.3.1. Um modelo humano sob uma linha de 500 kV

Sob uma linha de transmissão não há como colocar um modelo de corpo humano axissimétrico. Por esta razão, utiliza-se um modelo de corpo humano bidimensional cartesiano. Para uma idéia mais realista da distribuição de campo elétrico e densidade de corrente em um modelo do corpo humano bidimensional cartesiano, ele é colocado sob uma linha de transmissão de 500 kV. A linha escolhida onde se colocar o modelo foi a Colbún-Alto Jahuel. Aproveitando a malha para o domínio desta linha, insere-se os materiais de modo a criar uma região que represente um modelo humano. A figura 4.9 apresenta este modelo, com dimensões dadas em cm, com uma altura de 2.16 m, e com características de condutividade elétrica, $\sigma = 0.047 \text{ S.m}^{-1}$, e permissividade elétrica, $\epsilon = 10^6 \epsilon_0$, mesmas características do modelo do corpo humano apresentado no item 4.2.1. O modelo apresenta apenas a cabeça, o tórax, cintura, pélvis e pernas devido a dificuldade de refinar mais a malha.

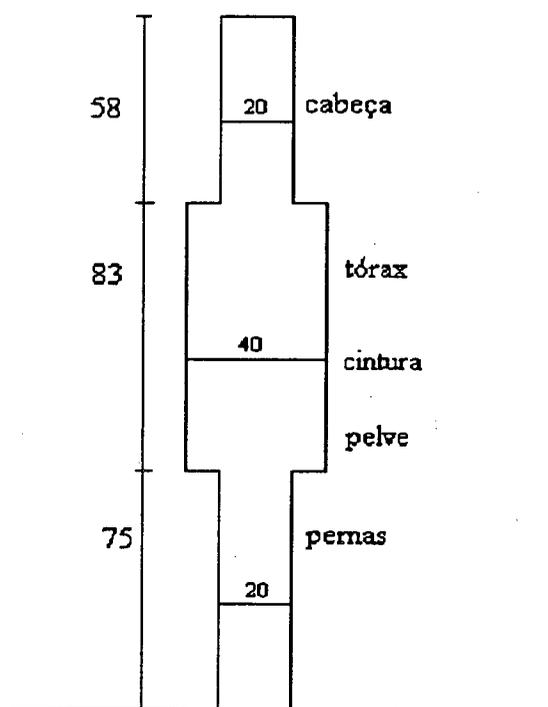


Figura 4.9 Modelo usado para a apresentação do campo elétrico e densidade de corrente internas.

4.3.2. Domínio

A figura 4.10 apresenta o domínio bidimensional cartesiano onde se encontra o modelo do corpo humano apresentado no item anterior, o 4.3.1. A linha de transmissão trifásica de 500 kV Colbún-Alto Jahuel é usada na análise do campo elétrico e as densidades de correntes induzidas no corpo humano. As dimensões são dadas em metro. O modelo do corpo humano está sob a fase C, local onde o campo elétrico é mais intenso e, como visto pela equação (3.4), também a densidade de corrente, porque a corrente é proporcional ao campo.

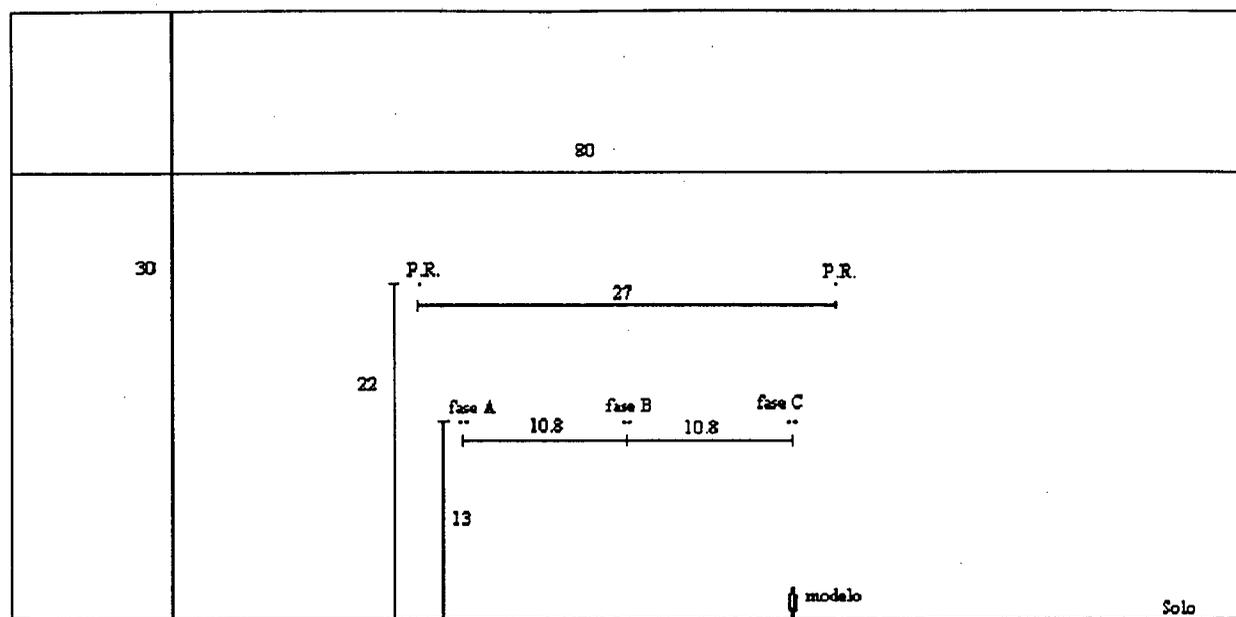


Figura 4.10 Domínio de análise para o estudo do campo elétrico e densidade de corrente num modelo sob uma linha de transmissão trifásica de 500 kV.

4.3.3. Malha do domínio

A figura 4.11 apresenta a malha do domínio com o modelo do corpo humano sob uma linha de transmissão trifásica de 500 kV. A malha possui 7132 elementos retangulares e 6890 nós. O domínio malhado possui 80 m, no eixo horizontal, e 30 m no eixo vertical. As condições de contorno são idênticas ao do item 2.4.2, com condição de contorno de Dirichlet na linha que define a superfície do solo e condição de Neumann no restante do contorno do domínio. Onde se encontra o modelo do corpo humano, é inserido o material com condutividade e permissividade elétrica idêntica a definida para o modelo do item 4.3.1, $\sigma = 0.047 \text{ S.m}^{-1}$ e $\epsilon = 8.854.10^{-6}$. No restante do domínio o material é o ar. Potenciais são impostos nos nós que representam os subcondutores das fases em suas respectivas coordenadas espaciais. Os potenciais impostos obedecem a tabela 2.1, de conversão de potenciais reais para os potenciais elétricos complexos.

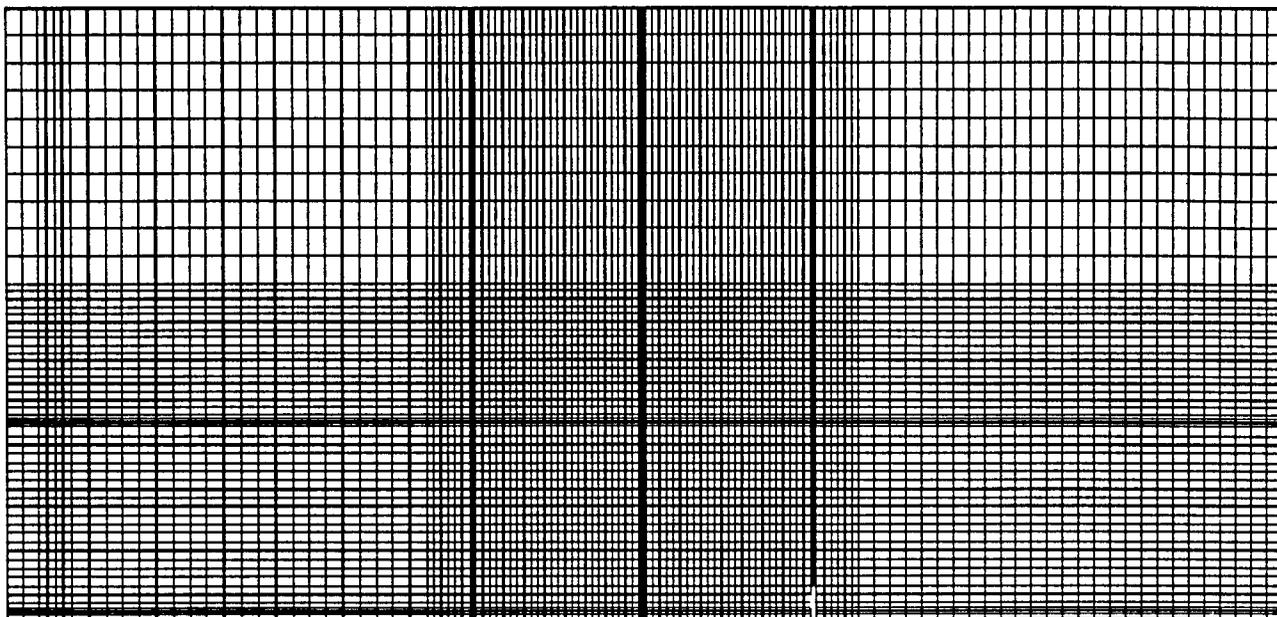


Figura 4.11 Malha do domínio.

4.3.4 Curvas equipotenciais

Com os valores dos potenciais escalares elétricos complexos calculados, são mostradas curvas equipotenciais, com valores em módulo do potencial complexo, para dar uma idéia da distribuição de campos elétricos na domínio. Assim, percebe-se como um corpo humano pode alterar a distribuição do campo. A figura 4.12 apresenta 8 curvas equipotenciais, com os seguintes valores (kV): 1, 3, 10, 25, 50, 100, 150, 280.

A presença do modelo do corpo humano altera a disposição das curvas refletindo a elevação do terra virtual nas suas imediações. Terra virtual porque a superfície externa do modelo têm potencial muito próximo de 0 V, de modo que o potencial nulo do solo se eleva sua superfície. Os potenciais e os campos no interior do modelo são na ordem de 10^6 vezes menores do que nas imediações externas. O raio de influência do modelo do corpo é pequeno se comparado com as dimensões do domínio. Potenciais acima de 50 kV são muito pouco influenciados por sua presença.

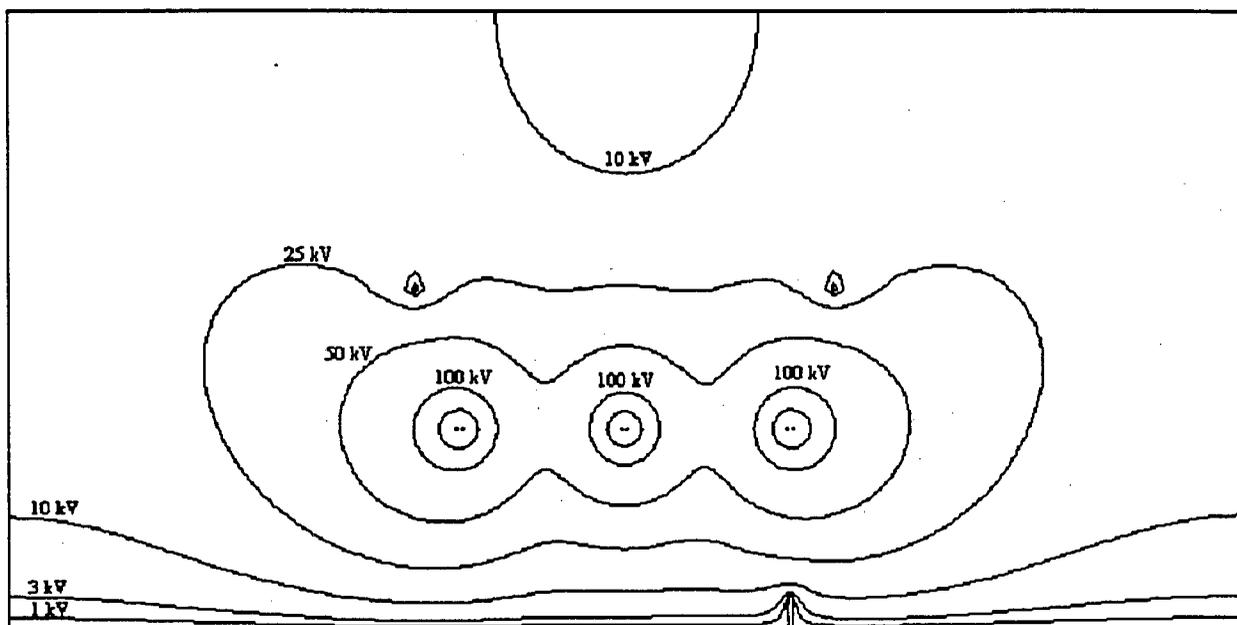


Figura 4.12 Curvas equipotenciais num domínio com um modelo do corpo humano.

4.3.5. Valores de campo elétrico no modelo humano

Com os potenciais escalares elétricos complexos calculados, em cada elemento da malha atravessado pela linha que vai dos pés a cabeça no modelo do corpo, calcula-se o campo elétrico através da expressão (1.67), constante dentro de cada elemento.

A figura 4.12 apresenta a curva de campo elétrico no modelo do corpo humano quando está embaixo uma linha de 500 kV. O campo elétrico é mais intenso nas regiões onde a largura é menor, como a cabeça e pernas. A linha onde foi calculada a intensidade do campo vai dos pés à cabeça, com a referência nos pés.

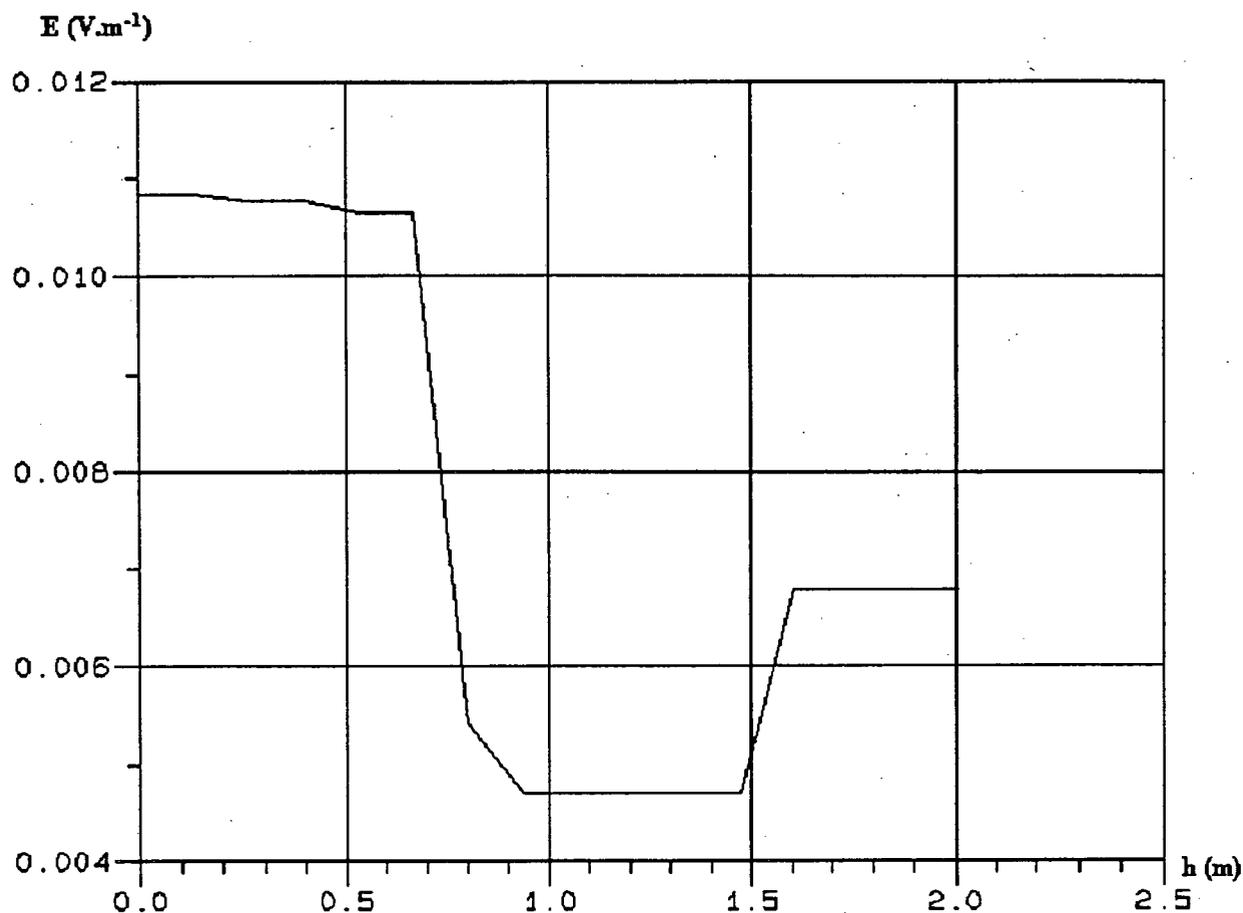


Figura 4.13 Distribuição de campo elétrico dentro do modelo do corpo humano.

4.3.6. Densidade de corrente no modelo humano

Com os valores do campo elétrico, obtêm-se os valores da densidade de corrente em cada segmento da linha de acordo com a expressão (4.9). A figura 4.13 apresenta a curva da densidade de corrente no modelo do corpo humano, com altura em metros. Os maiores valores de corrente nas regiões de menor largura, como a cabeça e as pernas. Considerando-se que uma densidade de corrente de 1 mA.m^{-2} é suficiente para que algumas pessoas pecebam-na (Spiegel, 1976), o valor de 0.52 mA.m^{-2} pode ser pecebido por alguma pessoa mais sensível. Agora, que efeito a longo prazo está corrente provocaria no organismo humano é uma incógnita. Porém, dificilmente alguém permanecerá por muito tempo sob uma linha que produza campos elétricos nesta ordem.

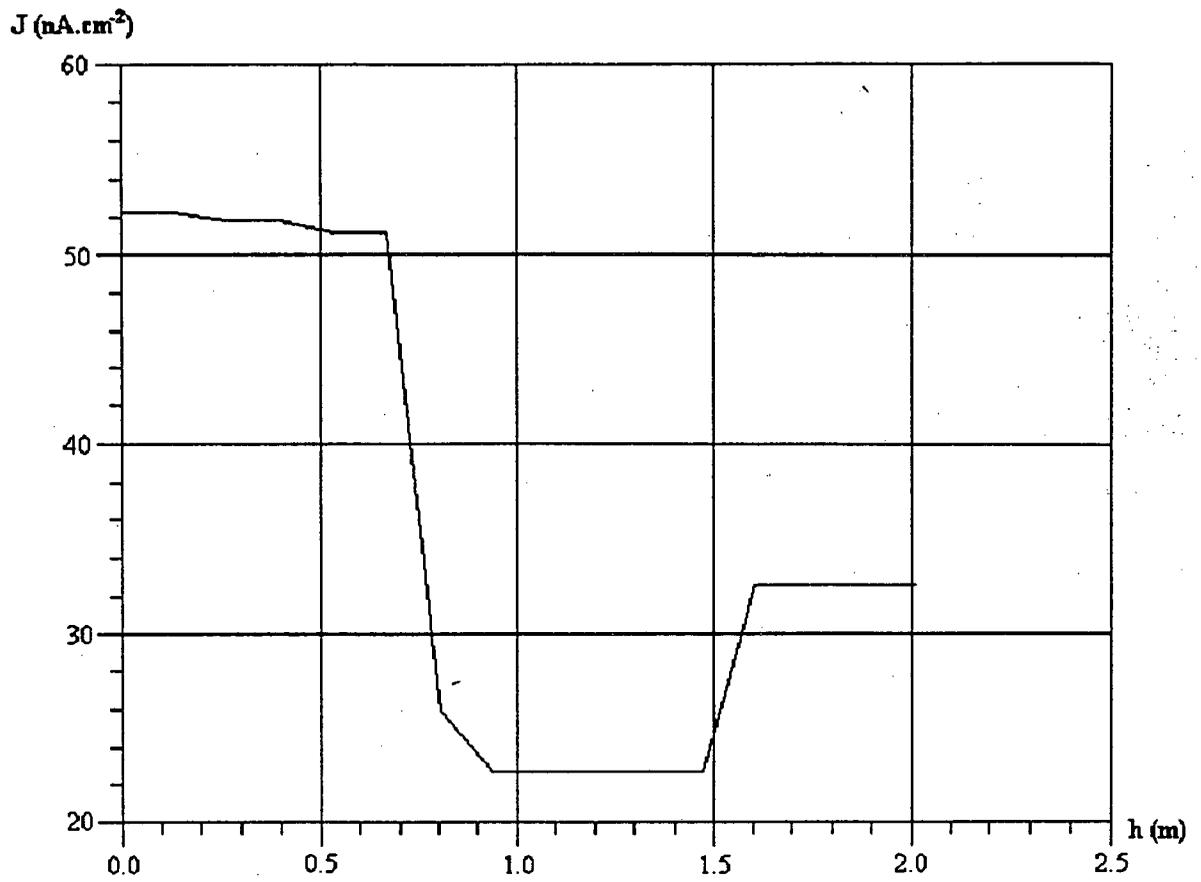


Figura 4.14 Densidade de corrente pela altura do modelo.

4.4 Conclusões

Comparando-se as curvas de campo elétrico e densidade de corrente no interior do modelo de corpo humano conforme as figuras 4.5 e 4.7 da literatura (Chiba et. al., 1984) e figura 4.6 e 4.8, obtidas através do EFCAD, percebe-se uma excelente concordância em termos de magnitudes. O EFCAD, utilizando o potencial escalar elétrico complexo, mostra-se adequado para calcular valores de campos elétricos e densidades de corrente no modelo axissimétrico, e este sistema permite a visualização de curvas equipotenciais, em módulo.

Como exemplo, colocou-se um modelo do corpo humano sob uma linha de transmissão de 500 kV para se avaliar a ordem de grandeza de campos elétricos e densidades de correntes induzidas. Nota-se que valores de densidade de corrente de $0,5 \text{ mA.m}^{-2}$ são obtidos, que são valores próximos de 1 mA.m^{-2} , referenciada como a densidade de corrente de percepção (Spiegel, 1976). Assim, pessoas mais sensíveis poderiam perceber diretamente este campo.

Conclusões

Neste trabalho foram apresentados dois sistemas de cálculo de campo elétrico em 2D gerado por linhas de transmissão trifásica: um através do método de simulação de cargas e o outro através do método de elementos finitos, e alguns dos efeitos dos campos elétricos e magnéticos sobre seres vivos. Entre os efeitos está a densidade de corrente induzida eletricamente. O sistema de cálculo através do MEF relativo aos assuntos deste trabalho está implementado em estações de trabalho SparcSun. Pela densidade das malhas alcançadas, este sistema não pôde ser implementado em micro computadores compatíveis PC/DOS. No futuro, com a implementação do sistema computacional EFCAD no ambiente Windows, será possível implementá-lo neste tipo de equipamento.

No **Capítulo 1**, foram apresentadas as formulações matemáticas para o cálculo do campo elétrico através do método de simulação de cargas e do método de elementos finitos utilizando o potencial escalar elétrico complexo. Para o MEF são apresentadas as formulações para o cálculo do campo elétrico em casos bidimensionais e axissimétricos.

No **Capítulo 2**, foram apresentados perfis da componente vertical do campo elétrico eficaz a altura de 1 m do solo, calculados pelo MEF, MSC e valores medidos. Da comparação entre os valores percebe-se que os valores obtidos pelo MEF concordam muito bem com os valores obtidos pelo clássico MSC e valores medidos.

Para o cálculo do campo elétrico eficaz, a utilização do potencial escalar elétrico complexo mostrou-se adequado. Demonstra-se que o campo elétrico eficaz é constante e representa o valor máximo do campo no ponto considerado.

O **Capítulo 3** apresenta uma pequena revisão bibliográfica dos efeitos dos campos elétricos e magnéticos sobre o corpo humano, com a formulação matemática de algumas das interações entre os campos elétricos e magnéticos. Também é apresentada uma resenha dos alegados efeitos de campos ELF, do qual se conclui que nada pode se afirmar com certeza a respeito da relação entre campo-câncer, a de maior interesse nas pesquisas. A relação entre campos e o humor das pessoas, efeito mais sutil, merece mais estudos.

No **Capítulo 4** é apresentada a formulação para calcular a densidade de corrente através do método de elementos finitos, para o caso bidimensional cartesiano e o caso axissimétrico. Da comparação dos resultados numéricos obtidos (2D e axissimétricos) com os do modelo fornecido na literatura (Chiba et. al., 1984), extrai-se a eficácia da formulação proposta. São apresentadas curvas de campo elétrico e densidade de corrente para um modelo sob uma linha de transmissão trifásica de 500 kV. Os valores máximos de densidade de corrente no modelo do corpo humano analisado são de $0,5 \text{ mA.m}^{-2}$, a metade do valor de 1 mA.m^{-2} , que é considerado a densidade de corrente de percepção (Spiegel, 1976). Pessoas muito sensíveis poderiam perceber esta densidade de corrente.

Pela facilidade de implementação do domínio de estudo e caracterização dos materiais existentes, o MEF apresenta-se como um método adequado para o estudo da distribuição de campo elétrico no organismo humano, em animais e objetos próximos a linha.

No futuro, como sugestão, a direção do estudo será a implementação do cálculo do campo elétrico 3D e 2D em terrenos irregulares, através do MEF, bem como o estudo dos efeitos do campo magnético. Conjuntamente com o cálculo do campo em três dimensões, procurar-se-á maior precisão na descrição da forma e das características elétricas e magnéticas do corpo humano. Como consequência, obter-se-á uma melhor precisão nos valores das correntes induzidas magnética e eletricamente em cada órgão do corpo. Outra abordagem seria o acoplamento entre o MSC, para calcular o campo elétrico em qualquer ponto do espaço e o MEF, para o cálculo do campo em regiões menores, como o corpo humano, onde existem meios com diferentes características de permissividade e condutividade elétricas.

Referências Bibliográficas

- ADEY, W. R., " Electromagnetic Field Interaction in the Brain", International Conference: Dynamics of Sensory and Cognitive Processing of the Brain, Berlin, August, 1985.
- ANSI/IEEE, "IEEE Standard Procedures for measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from ac Power Lines ",ANSI/IEE STD 644-1987.
- ANDERSON, O. W.,"Finite Element Solution of Complex Potential Electric Fields", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, pq 1156-61, July/August, 1977.
- BARNES, F.;WATCHEL, H.; SAVITZ, D.; FULLER, J., "Use of wiring configuration and Wiring Codes for Estimating Externally Generated Electric and Magnetic Fields", Bioelectromagnetics, Vol. 10, 13-21, 1989.
- BARNES, F. S., "The Effects of Time Varying Magnetic Fields on Biological Materials", IEEE Trans. on magnetics, MAG-26, Vol. 5, 2092-2097, 1990.
- BASTOS, J. P. A., Eletromagnetismo e Cálculo de Campos, Florianópolis, Editora da UFSC, 1992.
- BEASLEY, M. D. R.; PICKLES, J. H.; D'AMICO, G.; BERETTA, L.; FANELLI, M.; GIUSEPPETTI, G., GALLET, G.; GREGOIRE, J. P., "Comparative Study of Three Methods for Computing Electric Fields", Proc. IEE, vol. 126, 126-134, 1979.
- BECKER, E. B.; CAREY,G.F.; ODEN, J. T., Finite Elements: an Introduction, Vol. I in the Texas finite Element Series, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, Printice Hall, 1981.
- CAMARGO,C. C. B., Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, Editora da UFSC, 1990.
- CEI/IEC,"Measurement of Power Frequency Electric Fields",CEI-883, 1987.

- CHIBA, A.; ISAKA, K., KITAGAWA, M., "Application of Element Finite Method to Analysis of Induced Current Densities Inside Human Model Exposed to 60-Hz Electric Field", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-103, No. 7, July, 1984.
- COCORAN, R. P., "Extremely Low Frequency Exposure Limits Relative to Military Electrical/Electronic System Environments", IEEE International Symposium on EMC, Symposium Recrds pg. 62, Anaheim, California, 1992.
- CRISTEA, N. I., "Compatibilidad Electromagnética - la Influência del Campo Electromagnético sobre los organismos Biológicos y los Equipos Electricos y Electrónicos", Electrotécnica, No. 6, Buenos Aires, 1990.
- CRISTEA, N. I., "Influência do Campo Electromagnético sobre o Organismo Humano", VII Encontro Argentino -Brasileiro do Setor Energético, Foz do Iguaçu, Abril, 1994.
- DALZIEL, C. F., "Thresold of Perception Currents", Electrical Engineering, Vol. 73, 625-630, 1954
- DALZIEL, C. F., "The Effects of Electric Shock on Man", IRE Trans. Medical Electronics, PGME-5, May, 1956.
- DALZIEL, C. F., "Thresold 60- Cycle Fibrillating Currents", Trans. AIEE, Vol. 79, 667-673, October, 1960.
- DALZIEL, C.F.; LEE, W. R., "Lethal Electric Currents", IEEE Spectrum, 44-50, February, 1969.
- DALZIEL, C. F., "Electric shock Hazard", IEEE Spectrum, 41-50, May, 1972.
- DELAPLACE, L. R.; REILLY, J. R., "Electric and Magnetic Field Coupling from High Voltage AC Power Transmisssion Lines - Classification of The Short-Term Effects on People", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-97, No 6, 2243-2252, Nov/Dec, 1978.
- DENO, D. W., "Transmission Line Fields", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 95, No. 5, 1600-1611, 1976.

- DENO, D. W., "Currents Induced in the Human Body by High Voltage Transmission Line Electric Field - Measurement and Calculation of Distribution and Dose", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS - 96, No. 5, Sept/Oct, 1977.
- DIPLACIDO, J.; SHIH, C. H., WARE, B. I., "Analysis of the Proximity Effects in the Electric Field Measurements", IEEE Trans. on PAS., Vol. Vol. PAS-97, No. 6, Nov/Dec., 1978
- EPSTEIN, B. R.; FOSTER, K. R., "Anisotropy in the Dielectric Properties of Skeletal Muscle", Med. Biol. Eng. Comp., Vol. 21, 1983.
- FUCHS, R. D., Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas, Teoria das linhas em regime permanente, Vol. 2, Rio de Janeiro, Livros Técnicos: Itajubá, Escola de Engenharia, 1977.
- GRUPO CIGRÉ, "Currents Status of Research on Power Frequency Electric and Magnetic Fields - Background Paper", IEEE Engineering Review, Tomo 11, No. 8, 1991.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R., Física II, Vol. 1, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1976.
- HAMMAM, M. S.; BAISHIKI, R.S., "A Range of Body Impedance Values for Low Voltage, Low Source Impedance Systems of 60 Hz", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS_102, No 5, 1097-1103, May, 1983.
- INDIRA, NAIR; MORGAN, M. G., "60 Hz and the Human Body", IEEE Spectrum, tomo 27, No. 8, 1990.
- IESA (INTERNACIONAL ENGENHARIA S. A.), Campo Elétrico, Etapa I, Vol. I-B, 1987.
- KAUFMAN, G. E.; MICHAELSON, S. M., "Critical Review of Biological Effects of Electrical and Magnetic Fields", Biologic and Clinic Effects of Low Frequency Magnetic and Electric Fields, LAURADO, J. G. et. all. (eds), Charles L. Thomas Publisher, Springfield, 1974.
- KEESEY, J. C., LETCHER, F. S., "Minimum Thresholds for Physiological (Responses to Flow of Alternating Electric Current Through the Human Body at Power-

Transmission Frequencies", Naval Medical Research Institute, Project MR 005.08 - 0030B, Report No 1, September, 1969.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M., Aterramento Elétrico, Florianópolis, Editora da UFSC, 1991.

MESQUITA, R. C., Cálculo de Campos Eletromagnéticos Tridimensionais Utilizando Elementos Finitos : Magnetostática, Quase-Estática e Aquecimento Indutivo, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1990.

ORTIZ N., L.; PORTELA, C. M., "Modelo Tridimensional das Linhas de Transmissão para o Cálculo do Campo Elétrico e Comparação com Valores Medidos", Anais do Congresso de Eletromagnetismo Aplicado, Vol. 1, Minas Gerais, 1992.

OSYPKA, P., "Quantitative Investigation of Currents Strength and Routing in AC Electrocutation Accidents Involving Human Beings and Animals", Technische Hochschule, Brunswick, West Germany, 1966, SLA Translation Center TT-66-11479.

OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT (OTA), OF THE U. S. CONGRESS, "Biological Effects of Power Frequency Electric and Magnetic Fields- Background Paper", BP-E-53, Washington, 1989.

POLK, C.; POSTOW, E., Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, Boca Raton, Florida, CRC Press, Inc., 1986.

PORTELA, C. M., ORTIZ, L. O., "Determinação do Erro de Medição e Cálculo do Campo Elétrico nas Linhas de Transmissão a Freqüência Industrial", I SIDEE Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte, 1990.

PORTELA, C. M., "Cálculo do Campo Elétrico em Subestações", 1º. Simpósio Franco-Brasileiro sobre Cálculo de Campos Elétricos e Magnéticos, Florianópolis, Março de 1987.

SENDAULA, H. M.; WILSON, D. W., MEYER, R. C.; JOHNSON, R. R., "Electric Fields Induced by EHV Transmission over Irregular Terrain", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-102, No.5, May, 1983.

- SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P., "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields", IEEE Trans. on PAS., Vol. 73, 1660-1668, 1974.
- SPIEGEL, R. J.. "Magnetic Coupling to a Prolate Spheroid Model a Man", IEEE Power and Engineering Society, Paper No. f76564-0, January, 1976.
- TAKUMA, T.; KAWAMOTO, T.; FUJINAMI, H., "Charge Simulation with Complex Fictitious Charges for Calculating Capacitive-Resistive Fields", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-100, No.11, 4665-4672, 1981.
- THOMPSON, G., "Shock Thresold Fixes Appliance Insulation Resistance", Electric World, Vol. 101, 793-795, June, 1933.
- VANTI, M. , Um Sistema Automático para Geração de Malhas Adaptativas, Dissertação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- ZIENCIEWICZ, O. C.; MORGAN, K., Finite Elements and Approximation, John Wiley & Sons, New York, 1983.

APÊNDICE

ANEXO A1. Valores limites de campos eletromagnéticos

A exposição a radiação não-ionizante não está sujeita a limites unanimemente aceitos. Alguns países têm estabelecido padrões de exposição máximo admitida que cobrem um amplo espectro eletromagnético, tanto para população em geral quanto para profissionais do setor elétrico. São profissionais do setor elétrico eletricitistas, trabalhadores em linhas elétricas ou de comunicação, trabalhadores em eletrometalurgia, soldadores, etc.

Em 1990, a IRPA introduziu tais padrões, para o caso das frequências industriais, limitando a densidade máxima de corrente das correntes induzidas a cabeça e ao tronco humano, para uma exposição contínua a campos de 50/60 Hz, a 10 mA.m^{-2} . estes valores limites (Cororan, 1992; Indira e Morgan, 1990), vistos na TABELA A1.1.

TABELA A1.1 - Valores limites de campo para a IRPA

Tipo de exposição	B(μT)	E (kV/m)
Ocupacional		
Por um dia completo de trabalho	500	10
Por período curto	5000	--
Instantâneo	25000	--
População em geral		
Por tempo de 24 horas	100	5
Por horas por dia	1000	--

Outros limites para exposição humana a campos elétricos e magnéticos na frequência industrial são fornecidos pela TABELA A1.2, de acordo com outros institutos (Indira e Morgan, 1990):

TABELA A1.2 - Valores limites de campos para vários institutos:

Padrão	E(kV/m)	B(μT)
ANSI	--	200
NRPB	12	2000
VDE	--	6000
ex- URSS	10	1800
ACGIH	--	1000

ANEXO A2 - Conceitos de tensão de toque e tensão de passo

Os riscos a saúde se dão em função de correntes de falha percorrendo a estrutura metálica das torres de transmissão ou pela queda de um raio (Kindermann e Campagnolo, 1991).

A2.1 Tensão de toque

É a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica ao alcance da pessoa e um ponto no chão situado a 1 metro de distância da base da estrutura.

O Potencial máximo gerado por um aterramento durante o período de defeito não deve produzir uma corrente de choque superior a limitada por Dalziel para corrente de fibrilação ventricular. Ver figura A2.1 (Kindermann e Campagnolo, 1991).

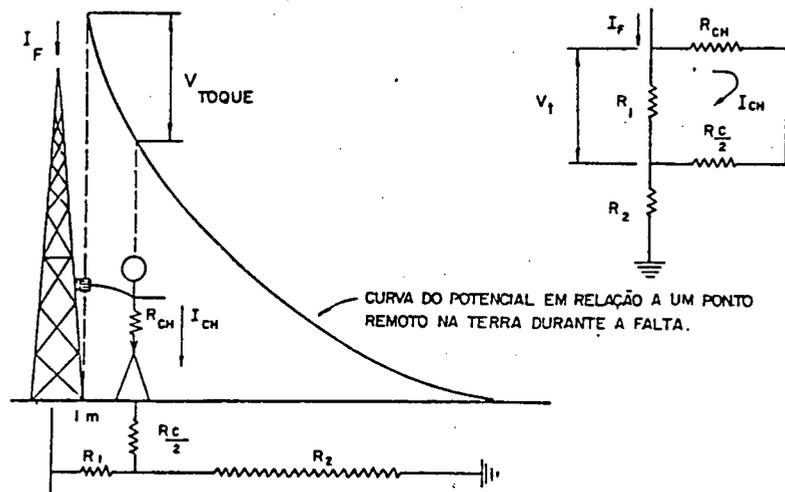


Fig. A2.1 - Tensão de toque (Kindermann e Campagnolo, 1991)

A tensão de toque é dada pela expressão:

$$V_t = \left(R_{ch} + \frac{R_C}{2} \right) \cdot I_{ch} \quad (\text{A2.1})$$

Onde

R_{ch} - é a resistência do corpo humano dada no item 3.2.2 de 1000Ω . Por considerar a resistência da pele das superfícies de contato, diferente do que ocorre no cálculo da densidade de corrente induzida que leva em consideração apenas a resistência interna do corpo;

R_c -é a resistência de contato entre o corpo e o solo, que pode ser considerada igual a $3 \cdot \rho_s$ (esta a resistividade superficial do solo);

I_{ch} - corrente de choque que passa pelo corpo humano;

R₁ e **R₂** -resistências dos trechos de terra considerados.

Substituindo os valores , a expressão (A2.1) pode ser reescrita como

$$V_t = (1000 + 1.5\rho_s) \cdot I_{ch} \quad (\text{A2.2})$$

Com a tensão de toque a uma tensão limite, entre a mão e o pé, para não provocar a fibrilação ventricular, que é fornecida pela corrente limite de Dalziel (3.1), dada por:

$$V_{tmax} = (1000 + 1.5\rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (\text{A2.3})$$

A2.2. Tensão de passo

É a diferença de potencial existente entre os dois pés. Isto pode ocorrer quando os membros de apoio (os pés) se encontram em linhas equipotenciais diferentes. Estas linhas equipotenciais surgem no solo com o aparecimento de uma corrente de falha.

A figura A2.2 (Kindermann e Campagnolo, 1991) mostra a tensão de passo devido a queda de um raio no solo.

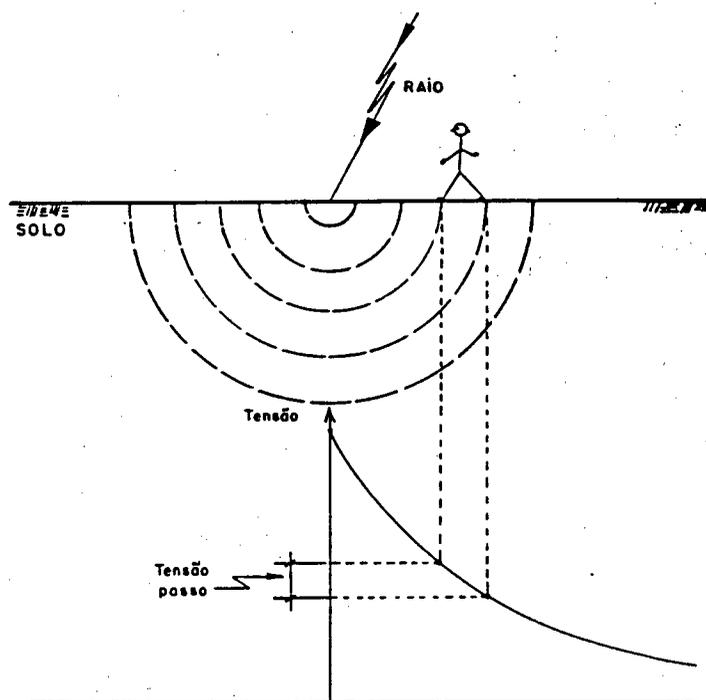


Fig. A2.2 - Tensão de passo devido a queda de um raio (Kindermann e Campagnolo, 1991)

A definição clássica da tensão de passo para a análise de segurança é a diferença de potencial que aparece entre dois pontos situados no chão e distantes de 1m (para pessoas), devido a passagem de corrente de falha para a terra. Ver figura A2.3 (Kindermann e Campagnolo, 1991)

Onde: R_1 , R_2 e R_3 são as resistências dos trechos considerados.

A expressão para o potencial de passo é:

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2R_c) \cdot I_{ch} \quad (\text{A2.4})$$

Fazendo $R_c = 3 \cdot \rho_s$, temos:

$$V_{passo} = (1000 + 6\rho_s) \cdot I_{ch}$$

A tensão de passo máxima (V_{pm}) tolerável é limitada pela máxima corrente que não provoca fibrilação ventricular. Deste modo:

$$V_{pm} = (1000 + 6\rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (\text{A2.5})$$

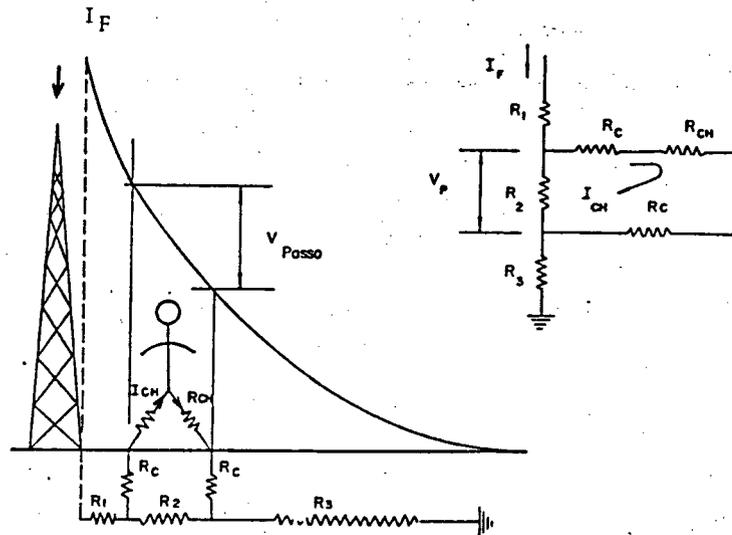


Fig. A2.3 - Tensão de passo devido a uma corrente de falta (Kindermann e Campagnolo, 1991)