

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:  
ESTUDO SOBRE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

**HUGO MANOEL OLIVEIRA DA SILVA**

**FORTALEZA**

**2012**

**Hugo Manoel Oliveira da Silva**

**LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:  
ESTUDO SOBRE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

Dissertação submetida à Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:  
Prof. Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

Fortaleza, fevereiro de 2012.

# **LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ESTUDO SOBRE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

**Hugo Manoel Oliveira da Silva**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

---

Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

Orientador

---

Fernando Luiz Marcelo Antunes, Phd

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora

---

Prof. Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

---

Prof. (a) \_\_\_\_\_

---

Prof. (a) \_\_\_\_\_

---

Prof. (a) \_\_\_\_\_

Fortaleza, fevereiro de 2012.

*Dedico este trabalho à minha esposa e ao nosso lindo filho Vitor Hugo, por todo amor compartilhado em nossa vida, a ela também pelo apoio e compreensão durante todos esses anos de estudos, a meus pais, a meus sogros e ao meu mestre orientador Ricardo Thé. Sem a participação deles não seria possível o término deste trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus pela vida em abundância que Ele tem me dado.

À minha esposa Vitória D'Ávila pelo apoio e compreensão durante todos esses anos de convívio.

Aos meus pais pela educação proporcionada e pelo incentivo que me deram desde os primeiros passos de formação acadêmica.

Aos meus sogros pelo apoio e incentivo nestes anos de estudos.

Hugo Manoel Oliveira da Silva

## **RESUMO**

Resumo da dissertação apresentada à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

### **LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ESTUDO SOBRE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

**Hugo Manoel Oliveira da Silva**

Este trabalho apresenta um estudo sobre linhas de transmissão no setor elétrico brasileiro, com enfoque na questão da exposição humana aos campos elétricos e magnéticos gerados por essas instalações, ressaltando aspectos regulatórios, técnicos e práticos das medições desses campos, além da compatibilidade das emissões com os limites estabelecidos pela legislação nacional. Para atingir este objetivo são descritos os princípios que regem o eletromagnetismo, bem como os modelos matemáticos que descrevem esse fenômeno. De forma específica, também é apresentada uma modelagem matemática para os cálculos de campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão de energia elétrica que garantem um resultado confiável. Em sua parte final é feita uma revisão da legislação brasileira sobre o assunto, assim como são apresentados alguns resultados de medições de campos elétricos e magnéticos emitidos por linhas de transmissão, além de simulações por meio de programa computacional.

Número de páginas: 92

Palavras-chave: energia elétrica, linha de transmissão, campo elétrico, campo magnético.

## **ABSTRACT**

Abstract of dissertation presented at Universidade Federal do Ceará as partial fulfillment of the requirements for the Master degree of in Electrical Engineering.

### **TRANSMISSION LINES OF ELECTRICITY: STUDY ON ELECTROMAGNETICS COMPATIBILITY**

**Hugo Manoel Oliveira da Silva**

This work presents a study on transmission lines in the Brazilian electric sector, focusing on the issue of human exposure to electric and magnetic fields generated by these facilities, highlighting regulatory and technical issues and measurements of these fields, as well as compatibility with emissions limits established by national legislation. To achieve this goal are described the principles of electromagnetism, as well as the mathematical models that describe this phenomenon. Specifically, is also presented a mathematical model for calculating electric and magnetic fields generated by transmission lines of electricity to ensure a reliable result. In its final part is a revision of the Brazilian legislation on the subject, and presents some results of measurements of electric and magnetic fields emitted by power lines, as well as simulations using the computer program.

Number of pages: 92

Keywords: electric power transmission line, electric field, magnetic field.

## SUMÁRIO

|  |             |
|--|-------------|
| <b>RESUMO .....</b>  | <b>vi</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>  | <b>x</b>    |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>  | <b>xi</b>   |
| <b>ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>   | <b>xii</b>  |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>CAPÍTULO 1</b>  |             |
| <b>INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1 JUSTIFICATIVA.....   | 2           |
| 1.2 OBJETIVO.....  | 4           |
| 1.3 ESTRUTURA .....  | 4           |
| <b>CAPÍTULO 2</b>  |             |
| <b>CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS.....</b>  | <b>6</b>    |
| 2.1 CAMPO ELÉTRICO.....  | 7           |
| 2.2 CAMPO MAGNÉTICO.....   | 8           |
| 2.3 GRANDEZAS DERIVADAS.....   | 8           |
| 2.4 UNIDADES DE MEDIDAS.....   | 12          |
| 2.5 EQUAÇÕES DE MAXWELL.....   | 13          |
| <b>CAPÍTULO 3</b>  |             |
| <b>LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL.....</b>          | <b>17</b>   |
| 3.1 NOÇÕES GERAIS SOBRE SISTEMA DE ENERGIA.....  | 17          |
| 3.2 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....   | 17          |
| 3.3 NORMAS ESPECÍFICAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....                     | 22          |
| 3.3.1 Norma Brasileira NBR nº 5422/1985.....   | 23          |
| 3.3.2 Resolução Normativa nº 191/2005 da ANEEL.....  | 27          |
| <b>CAPÍTULO 4</b>  |             |
| <b>METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....</b> | <b>29</b>   |
| 4.1 CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO.....  | 32          |
| 4.2 CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO.....   | 35          |
| <b>CAPÍTULO 5</b>  |             |
| <b>EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS.....</b>   | <b>40</b>   |
| 5.1 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS E POSSÍVEIS EFEITOS ADVERSOS À SAÚDE HUMANA.....                   | 40          |
| 5.2 COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP) .....                             | 42          |
| 5.3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA.....                              | 44          |
| 5.4 OUTRAS RECOMENDAÇÕES.....  | 44          |
| 5.5 EFEITOS DA IMPLANTAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM REGIÕES DENSAMENTE POVOADAS.....        | 46          |
| 5.6 PROCEDIMENTOS PARA REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....   | 51          |
| 5.7 PROCEDIMENTOS PARA REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE CAMPOS ELÉTRICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....    | 51          |



**CAPÍTULO 6**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>LEGISLAÇÃO BRASILEIRA.....</b>   | <b>52</b> |
| 6.1 DISPUTAS JUDICIAIS RELACIONADAS A CONSTRUÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....        | 52        |
| 6.1.1 Ação Civil Pública contra a Companhia Hidroelétrica do São Francisco.....       | 52        |
| 6.1.2 Ação judicial contra a Eletricidade de São Paulo S/A (ELETROPAULO).....         | 53        |
| 6.2 LEI FEDERAL SOBRE LIMITES DE EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO ..... | 53        |
| 6.3 RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 398/2010 DA ANEEL.....                                     | 55        |
| 6.4 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL.....   | 60        |
| 6.4.1 O meio ambiente na Constituição Federal.....                                    | 60        |
| 6.4.2 O ar atmosférico como parte do meio ambiente.....                               | 61        |
| 6.4.3 Ar atmosférico e poluição eletromagnética.....                                  | 61        |
| 6.4.4 Crime ambiental.....  | 62        |

**CAPÍTULO 7**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>MEDIÇÕES E CÁLCULOS DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....</b>                                  | <b>64</b> |
| 7.1 PROGRAMA CAMPEM.....   | 64        |
| 7.1.1 Metodologia dos cálculos.....  | 65        |
| 7.1.2 Interface gráfica do CAMPEM.....   | 65        |
| 7.1.3 Entrada de dados.....  | 67        |
| 7.1.4 Análise dos resultados.....  | 74        |
| 7.2 MEDIÇÕES E CÁLCULOS DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 KV.....                        | 74        |
| 7.2.1 Características da linha de transmissão.....   | 74        |
| 7.2.2 Cálculo dos campos elétrico e magnético.....   | 75        |
| 7.2.3 Medições dos campos elétrico e magnético.....  | 75        |
| 7.2.4 Análise dos resultados.....  | 79        |
| 7.3 CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 KV CALCULOS COM A UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA CAMPEM ..... | 79        |
| 7.3.1 Cálculo dos perfis de campos elétrico e magnético.....   | 80        |
| 7.4 MEDIÇÕES E CÁLCULOS DE CAMPOS ELÉTRICOS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 750 KV.....                                     | 82        |
| 7.4.1 Características da linha de transmissão.....   | 82        |
| 7.4.2 Resultados das medições e cálculos de campos elétricos.....  | 83        |
| 7.4.3 Análise dos resultados.....  | 84        |
| <b>CONCLUSÕES.....</b>   | <b>85</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>87</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1  | Campo elétrico devido a uma carga $Q$ ou uma distribuição equivalente de cargas.  | 7  |
| Figura 2.2  | Campo elétrico gerado pela diferença de potencial entre duas placas metálicas....   | 7  |
| Figura 2.3  | <i>Um movimento de cargas e o campo magnético gerado</i> .....  | 8  |
| Figura 2.4  | Dois materiais de diferentes permeabilidades mantêm diferentes densidades de fluxo para a mesma intensidade de campo..... | 9  |
| Figura 2.5a | Condutor reto.....  | 10 |
| Figura 2.5b | Dimensão do condutor.....   | 10 |
| Figura 2.6  | Relação entre densidade de corrente e intensidade de campo magnético.....   | 14 |
| Figura 2.7  | Relação entre a derivada temporal da densidade de fluxo magnético e intensidade de campo elétrico.....                    | 14 |
| Figura 2.8  | A natureza do fluxo elétrico.....   | 15 |
| Figura 2.9  | Campo elétrico produzido por uma linha de transmissão.....  | 15 |
| Figura 2.10 | Campo magnético produzido por uma linha de transmissão.....   | 16 |
| Figura 3.1  | Modelo institucional do setor elétrico brasileiro.....  | 20 |
| Figura 3.2  | Menor distância do condutor ao solo (ABNT, 1985).....   | 24 |
| Figura 3.3  | Parâmetros para cálculo da faixa de servidão de uma linha de transmissão.....   | 27 |
| Figura 4.1  | Representação do campo elétrico e magnético através da elipse.....  | 30 |
| Figura 4.2  | Sistema de coordenadas para cálculo de campo magnético.....   | 32 |
| Figura 4.3  | Representação dos condutores da linha de transmissão para o cálculo de fluxo magnético em um ponto $N$ .....              | 34 |
| Figura 4.4  | Distribuição linear de carga ao longo de um condutor.....   | 35 |
| Figura 4.5  | Representação dos condutores da linha de transmissão para o cálculo do campo elétrico em um ponto $n$ .....               | 36 |
| Figura 7.1  | Função Arquivo (manipulação de arquivos).....   | 65 |
| Figura 7.2  | Função Editar (edição de dados).....  | 66 |
| Figura 7.3  | Função Ferramentas (execução de caso).....  | 66 |
| Figura 7.4  | Função Ajuda (“help” do programa).....  | 67 |
| Figura 7.5  | Definição do perfil de cálculo.....   | 68 |
| Figura 7.6  | Interface Objeto - Definição de objeto esférico localizado acima do solo.....   | 68 |
| Figura 7.7  | Definição das características da linha de transmissão.....  | 69 |
| Figura 7.8  | Entrada dos dados das fases e pára-raios.....   | 69 |
| Figura 7.9  | Entrada dos dados das fases (“Feixe Regular”).....  | 70 |
| Figura 7.10 | Interface de execução dos módulos de cálculo dos campos.....  | 70 |
| Figura 7.11 | Resultado gráfico do campo elétrico.....  | 71 |
| Figura 7.12 | Resultado gráfico do campo magnético.....   | 71 |
| Figura 7.13 | Valores de campo elétrico por coordenada.....   | 72 |
| Figura 7.14 | Valores de campo magnético por coordenada.....  | 72 |
| Figura 7.15 | Relatório de dados do campo magnético.....  | 73 |
| Figura 7.16 | Relatório de dados do campo magnético.....  | 73 |
| Figura 7.17 | Relatório de dados da indução elétrica na esfera.....   | 74 |
| Figura 7.18 | Ambiente do vão da linha de transmissão de 500 kV da CEMIG.....   | 77 |
| Figura 7.19 | Perfil transversal do campo elétrico da Seção 28.....   | 77 |
| Figura 7.20 | Perfil transversal do campo magnético da Seção 28.....  | 78 |
| Figura 7.21 | Perfil transversal do campo elétrico da Seção 29.....   | 78 |
| Figura 7.22 | Perfil transversal do campo magnético da Seção 29.....  | 79 |
| Figura 7.23 | Perfis transversais de campo elétrico (a) e campo magnético (b), a 1,5 m do solo  | 81 |
| Figura 7.24 | Variação do valor do campo elétrico máximo com a altura dos condutores-fase...  | 82 |
| Figura 7.25 | Ambiente do vão da linha de transmissão de 750 kV de FURNAS.....  | 83 |
| Figura 7.26 | Perfil de campo elétrico transversal no ponto mais baixo da linha.....  | 83 |
| Figura 7.27 | Perfil de campo elétrico transversal medidos em todos os perfis da linha.....   | 84 |

## LISTA DE TABELAS

|   |           |
|---|-----------|
| Tabela 1.1 – Extensões, em quilômetros, das linhas de transmissão no Brasil.....                | 1         |
| Tabela 2.1 - Unidades do Sistema Internacional para grandezas elétricas e magnéticas.....       | 12        |
| Tabela 3.1 – Distância básica (ABNT, 1985).....   | 25        |
| Tabela 5.1 - Linhas de 69 kV da COELCE selecionadas para as medições dos campos.....            | 47        |
| Tabela 5.2 - Níveis máximos de campo elétrico medidos nas proximidades das linhas.....          | <b>47</b> |
| Tabela 5.3 - Níveis máximos de campo magnético medidos nas proximidades das linhas.....         | <b>47</b> |
| Tabela 5.4 – Campos medidos em residências no Ceará.....  | <b>49</b> |
| Tabela 5.5 – Identificação dos aparelhos eletrodomésticos.....                                  | <b>49</b> |
| Tabela 5.6 - Níveis máximos de campo magnético próximo a eletrodomésticos.....                  | <b>50</b> |
| Tabela 6.1 - Níveis de Referência para campos elétrico e magnético variantes no tempo (60 Hz).. | <b>56</b> |
| Tabela 7.1 - Características da linha de transmissão de 345 kV de FURNAS.....                   | <b>67</b> |
| Tabela 7.2 - Características da linha de transmissão de 500 kV da CEMIG.....                    | <b>75</b> |
| Tabela 7.3 - Características da linha de transmissão de 500 kV (caso-base).....                 | <b>80</b> |

## ABREVIATURAS E SIGLAS

|             |   |
|-------------|---|
| ABRICEM     | Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética      |
| ABNT        | Associação Brasileira de Normas Técnicas                      |
| ANEEL       | Agência Nacional de Energia Elétrica                          |
| CA          | Corrente contínua   |
| CC          | Corrente alternada  |
| CCEE        | Câmara de Comercialização de Energia Elétrica                 |
| CEMIG       | Companhia Energética de Minas Gerais                          |
| CEPEL       | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica                       |
| COELCE      | Companhia Energética do Ceará                                 |
| CHESF       | Companhia Hidro Elétrica do São Francisco                     |
| CMSE        | Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico                     |
| CPE         | Conselho Nacional de Política Energética                      |
| ELETROBRAS  | Centrais Elétricas Brasileiras S/A                            |
| ELETROPAULO | Eletricidade de São Paulo S/A                                 |
| ELETROSUL   | Eletrosul Centrais Elétrica S/A                               |
| EPE         | Empresa de Pesquisa Energética                                |
| FURNAS      | Centrais Elétricas de Furnas                                  |
| ICNIRP      | Internacional Commission On-Non Ionizing Radiation Protection |
| IEEE        | Institute of Electrical and Electronics Engineers             |
| LT          | Linha de Transmissão  |
| MME         | Ministério de Minas e Energia                                 |
| NBR         | Norma Brasileira  |
| OMS         | Organização Mundial de Saúde                                  |
| ONS         | Operador Nacional do Sistema                                  |
| PRODIST     | Procedimentos de Distribuição                                 |
| SIN         | Sistema Interligado Nacional                                  |
| UFC         | Universidade Federal do Ceará                                 |
| UFMG        | Universidade Federal de Minas Gerais                          |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b> | <b>Nome</b>                    | <b>Unidade</b>             | <b>Abreviatura</b>  |
|----------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|
| V              | Tensão elétrica                | Volt                       | [V]                 |
| A              | Corrente Elétrica              | Ampere                     | [A]                 |
| R              | Resistência Elétrica           | Ohm                        | [Ω]                 |
| E              | Intensidade de Campo Elétrico  | Volt por metro             | [V/m]               |
| H              | Intensidade de Campo Magnético | Ampere por metro           | [A/m]               |
| D              | Densidade de campo elétrico    | Couloms por metro quadrado | [C/m <sup>2</sup> ] |
| B              | Densidade de campo magnético   | Testa ou Gauss             | [T] ou [G]          |
| $\epsilon$     | Permissividade elétrica        | Farad por metro            | [F/m]               |
| $\mu$          | Permeabilidade magnética       | Henry por metro            | [H/m]               |

## Capítulo 1

### INTRODUÇÃO

Impulsionado pelo desenvolvimento econômico e social brasileiro, aliado ao crescimento populacional, o setor elétrico tem se deparado com grandes desafios para acompanhar a crescente demanda por energia elétrica verificada nos últimos anos, surgindo assim a necessidade de expansão e modernização do sistema elétrico nacional. É a vida moderna se tornando cada vez mais dependente da eletricidade e de novas tecnologias.

O sistema elétrico nacional é considerado um dos mais complexos do mundo, principalmente devido à extensão continental do território brasileiro. Um fator de destaque é o fato de que a principal fonte de geração de energia elétrica vem do aproveitamento dos potenciais hidráulicos, os quais estão localizados em diversos pontos do território nacional, porém relativamente distantes dos principais centros de carga. Disso decorre o grande desafio de transportar grandes blocos de cargas por meio de linhas de transmissão de energia elétrica.

A Tabela 1.1 mostra dados do *Operador Nacional do Sistema* sobre as extensões das linhas de transmissão por nível de tensão para os anos 2001 a 2008.

Tabela 1.1 – Extensões em quilômetros das linhas de transmissão no Brasil

| Tensão<br>(kV) | ANO        |            |            |            |            |            |            |            |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                | 2001       | 2002       | 2003       | 2004       | 2005       | 2006       | 2007       | 2008       |
| 138 CA         | 51.301,90  | 51.658,60  | 51.709,00  | 51.523,20  | 52.019,00  | 51.970,90  | 52.019,20  | 52.092,20  |
| 230 CA         | 32.537,30  | 32.997,40  | 33.999,70  | 35.073,80  | 35.736,50  | 36.342,50  | 37.155,50  | 37.709,90  |
| 345 CA         | 9.023,50   | 9.021,00   | 9.021,00   | 9.047,00   | 9.579,10   | 9.579,10   | 9.772,10   | 9.772,10   |
| 440 CA         | 6.667,50   | 6.667,50   | 6.667,50   | 6.667,50   | 6.667,50   | 6.671,20   | 6.671,20   | 6.671,20   |
| 500 CA         | 17.510,10  | 19.525,20  | 23.659,00  | 24.924,40  | 26.771,10  | 29.341,20  | 29.392,20  | 31.868,30  |
| 600 CC         | 1.612,00   | 1.612,00   | 1.612,00   | 1.612,00   | 1.612,00   | 1.612,00   | 1.612,00   | 1.612,00   |
| 750 CA         | 2.683,00   | 2.683,00   | 2.683,00   | 2.683,00   | 2.683,00   | 2.683,00   | 2.683,00   | 2.683,00   |
| TOTAL          | 121.335,30 | 124.164,60 | 129.351,10 | 131.530,90 | 135.068,20 | 138.199,80 | 139.305,10 | 142.408,60 |

Observa-se que as linhas de transmissão com tensão de 500 kV apresentam o maior aumento em extensão (cerca de 82% no período). As linhas de 138 e 230 kV tiveram menores acréscimos, mas continuam com as maiores extensões.

Não obstante a necessidade crescente de expansão da oferta de energia elétrica, e conseqüentemente dos sistemas de transmissão, tem se observado um aumento das exigências dos organismos ambientais e da própria sociedade por maior segurança das instalações do sistema elétrico, especialmente em virtude dos possíveis efeitos adversos à saúde humana causados pelos campos eletromagnéticos gerados por linhas transmissão e subestações. O fato é que alguns estudos estatísticos apontam uma relação entre pessoas que vivem próximas às linhas de transmissão de energia elétrica e o desenvolvimento de patologias nas mesmas, principalmente leucemia infantil e câncer.

Nesse contexto surge a necessidade do desenvolvimento de pesquisas científicas para se conhecer os reais efeitos dos campos eletromagnéticos na saúde humana. De fato, especialistas de importantes centros de pesquisa do mundo têm pesquisado sobre o assunto, com os resultados sendo apresentados em encontros científicos de âmbito nacional e internacional.

O resultado dessas pesquisas torna-se de essencial importância para a edição de normas ambientais e técnicas com vistas a estimular a prestação dos serviços públicos de energia elétrica pelo capital privado dentro de regras claras e fazendo com que a expansão e a modernização do setor se dê de maneira sustentável, de forma a promover o desenvolvimento econômico em harmonia com o meio ambiente, para que não haja comprometimento da qualidade de vida das gerações futuras. Com isso fica clara a necessidade de se harmonizar a evolução da indústria brasileira de energia elétrica com o meio ambiente.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

O pouco conhecimento e ausência de uma legislação brasileira específica sobre limites de exposição humana a campos elétricos e magnéticos gerados pelas instalações de energia elétrica constituiu-se em um fator negativo para a expansão e modernização do setor elétrico nacional, contribuindo para o surgimento de manifestações sociais contrárias a construção de novas instalações de energia elétrica. Aliada a isso, surgem também algumas demandas judiciais restringindo a construção e a operação de linhas de transmissão de energia elétrica.

Tudo isso constitui elementos necessários para mobilização das autoridades brasileiras sobre a questão dos possíveis efeitos adversos dos campos elétricos e magnéticos na saúde humana. Uma das principais reações governamentais nesse sentido ocorreu no Congresso

Nacional ainda no final dos anos 90. Tratava-se de um Projeto de Lei visando estabelecer os limites de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos oriundos das instalações de energia elétrica e de telecomunicações. O resultado foi a aprovação da Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009, que trouxe uma série de repercussões para os setores elétrico e de telecomunicações.

O principal ponto da Lei nº 11.934/2009 foi a adoção de uma recomendação sobre limites de a exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos para a frequência de até 300 Hz. Tal recomendação vem de uma organização internacional denominada *Internacional Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)*, constituída por uma equipe multidisciplinar de cientistas de vários países, e reconhecida oficialmente pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

A primeira repercussão da Lei nº 11.934/2009 para o setor elétrico brasileiro refere-se à obrigação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de editar os regulamentos específicos, além de coordenar a fiscalização para o cumprimento dos limites estabelecidos. Nesse sentido, no dia 23 de março de 2010 a ANEEL aprovou a Resolução Normativa nº 398/2010.

A segunda e mais importante repercussão foi para os agentes do setor elétrico das áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, que num primeiro momento deverão apresentar à ANEEL os valores referentes à emissão de campos elétricos e magnéticos de suas instalações, atentando para os limites estabelecido pela *ICNIRP*.

Outra repercussão importante trazida pela referida lei refere-se à questões ambiental e criminal.

Nesse contexto surge a responsabilidade da ANEEL pela fiscalização do cumprimento dos limites estabelecidos. Trata-se de uma etapa muito delicada, já que os valores das emissões poderão ser medidos ou calculados pelos proprietários das instalações, o que reclama uma fase de validação dos dados pela ANEEL.

A literatura técnica dispõe de alguns métodos de cálculos de campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão possivelmente implementáveis em um programa computacional, que poderá ser utilizado pela ANEEL para a validação dos dados apresentados pelos agentes.



## **1.2 OBJETIVO**

Este trabalho se propõe a analisar a legislação brasileira sobre limites exposição humana a campos elétricos e magnéticos, bem como verificar a adequação das linhas de transmissão do setor elétrico aos limites estabelecidos.

Para que esses objetivos sejam alcançados faz-se necessário inicialmente conhecer o fenômeno físico denominado campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, bem como suas relações com as linhas de transmissão de energia elétrica, com ênfase às equações de Maxweel.

Outro objetivo desse trabalho é apresentar um programa computacional para o cálculo confiável dos campos elétricos e magnéticos emitidos por uma linha aérea de transmissão de energia elétrica. A importância dessa ferramenta está relacionada às características do sistema elétrico nacional e principalmente às grandes extensões das linhas de transmissão, o que demandaria um esforço muito grande para a realização de medidos de todas as instalações. Com um programa computacional haverá maior eficiência no processo de aquisição de dados, visto que podem previamente conhecidas as características de construção de operação de uma linha de transmissão.

## **1.3 ESTRUTURA**

O desenvolvimento da dissertação segue o seguinte roteiro: relato das justificativas, objetivo e desenvolvimento da dissertação; descrição dos princípios do eletromagnetismo; explanação sobre o setor elétrico brasileiro, com ênfase às linhas de transmissão; metodologia de cálculo de campos elétricos e magnéticos gerados por uma linha de transmissão; revisão bibliográfica sobre a questão da exposição humana a campos eletromagnéticos; análise da legislação brasileira sobre o assunto e apresentação de programa computacional para cálculo de campos elétricos e magnéticos gerados por uma linha aérea de transmissão.

Esses itens serão apresentados sob a forma de capítulos, conforme a seguinte seqüência:

Capítulo 1 – Introdução:

Justifica a escolha do tema apresentando informações do setor elétrico brasileiro e sobre a Lei nº 11.934/2009, que, dentre outras coisas, trouxe uma série de repercussões para os agentes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

## Capítulo 2 – Campos eletromagnéticos

Busca-se neste capítulo abordar o fenômeno físico denominado ondas ou campos eletromagnéticos, suas origens e forma de propagação, bem como as formulações matemáticas.

## Capítulo 3 - Linhas de transmissão de energia elétrica no sistema interligado nacional.

Visando a uma melhor compreensão do assunto, é apresentada uma breve explanação sobre o sistema de energia elétrica brasileiro, com ênfase para as linhas de transmissão, objeto de estudo do presente trabalho.

## Capítulo 4 – Metodologia para cálculo de campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão de energia elétrica.

Busca-se neste capítulo apresentar uma metodologia consagrada para os cálculos de campos elétricos e magnéticos gerados por uma linha de transmissão.

## Capítulo 5 – Exposição humana a campos eletromagnéticos.

Neste capítulo serão apresentadas informações importantes sobre a situação dos estudos epidemiológicos sobre exposição humana a campos elétricos e magnéticos, bem como as principais recomendações nacional e internacional.

## Capítulo 6 – Legislação brasileira.

Busca-se apresentar e analisar nova legislação brasileira sobre os limites de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos.

## Capítulo 7 – Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão.

Visa apresentar o resultado de medições já realizadas, bem como um programa computacional para cálculo de campos elétrico e magnético e de indução de correntes e tensões em objetos na vizinhança de uma linha de transmissão de energia elétrica.

## Capítulo 2

# CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

O propósito deste capítulo é abordar o fenômeno físico denominado ondas ou campos eletromagnéticos. A origem das ondas ou campos eletromagnéticos pode ser atribuída a duas categorias de fontes: as naturais e as criadas pela ação humana. As naturais podem ser encontradas no meio ambiente, como, por exemplo, o campo magnético natural da terra, os campos elétricos criados por nuvens carregadas, as descargas atmosféricas etc. Dentre as criadas pelo homem podemos destacar as decorrentes da geração e transmissão de energia elétrica, bem como da comunicação por meio da transmissão de dados sem fio. Nesse sentido, todos os equipamentos elétricos e eletrônicos são fontes geradoras de ondas eletromagnéticas.

O conceito de onda eletromagnética foi postulado pelo famoso físico escocês James C. Maxwell, que desenvolveu a chamada teoria do eletromagnetismo para explicar a relação entre a eletricidade e o magnetismo, resultando nas conhecidas equações de Maxwell. Uma dessas relações é a de que os campos elétricos e magnéticos se propagam perpendicularmente um ao outro.

Nesse sentido destacamos as notas introdutórias apresentadas na Enciclopédia Mirador Internacional (1975, p. 9554, grifo original) sobre o assunto:

**Introdução.** A existência de ondas eletromagnéticas foi prevista pela primeira vez por Maxwell, que resumiu as leis básicas do eletromagnetismo num conjunto de equações e, em seguida, mostrou que essas equações admitiam soluções ondulatórias para os campos elétrico e magnético. Segundo essas equações, que receberam o nome de ‘equações de Maxwell’, um campo magnético variável no tempo induz o aparecimento de um campo elétrico; analogicamente, um campo elétrico variável gera um campo magnético. Assim, as variações temporais dos campos elétricos e magnéticos propagam-se no espaço.

Uma observação importante é que, ao contrário das ondas mecânicas, a onda eletromagnética não necessita de um meio material para se propagar, pois o campo elétrico e o campo magnético podem ser estabelecidos na ausência de matéria, ou seja, a radiação eletromagnética pode se propagar no espaço vazio.

Pode-se então dizer que ondas eletromagnéticas formadas pela combinação de campos elétrico e magnético que se propagam no espaço ou em meio materiais transportando energia.

## 2.1 Campo elétrico

O estudo do campo elétrico parte do conhecimento da chamada Lei de Coulomb, sucintamente explanada por PLONUS (1978, p. 2) nos seguintes termos:

Experimentalmente pode-se mostrar que existe força entre duas cargas. Matematicamente a relação de força entre duas cargas pontuais  $Q_1$  e  $Q_2$  pode ser expressa por  $E = k Q_1 Q_2 / R^2$  onde  $R$  é a distância entre as cargas e  $k$  é uma constante de proporcionalidade que depende do sistema de unidades utilizado.

Com base na Lei de Coulomb, segue o autor discorrendo sobre o campo elétrico:

A Lei de Coulomb nos fornece a força que será exercida em uma carga pontual  $Q_2$  quando é colocada em sua vizinhança uma outra carga pontual  $Q_1$ . Se movermos  $Q_2$  mantendo-se  $Q_1$  em uma posição fixa, podemos dizer que um campo elétrico permanece em todo o espaço ao redor de  $Q_1$ . A magnitude do campo elétrico em um ponto é a força por unidade de carga exercida sobre uma carga de teste positiva nesse ponto, desde que a carga de teste, chamada de  $\Delta Q_2$ , seja pequena o suficiente tal que não perturbe o campo que está sendo testado. O campo elétrico é um vetor porque a força exercida sobre  $\Delta Q_2$  tem direção e magnitude. Agora podemos definir o campo elétrico em um ponto onde  $\Delta Q_2$  é localizada como

$$E = \frac{F}{\Delta Q_2} = \frac{Q_1 K}{4\pi\epsilon R}$$

Dessa forma, uma carga ou um arranjo de cargas elétricas  $Q$ , estacionárias no espaço, tem a propriedade de criar uma grandeza elétrica no espaço, chamada de intensidade de campo elétrico  $E$ , conforme mostrado na Figura 2.1.

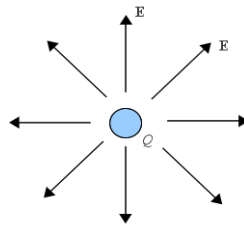


Figura 2.1 – Campo elétrico devido a uma carga  $Q$  ou uma distribuição equivalente de cargas.

A propagação de um campo elétrico é também ilustrada com o exemplo das placas metálicas paralelas submetidas a uma diferença de potencial elétrico, conforme Fig. 2.2.

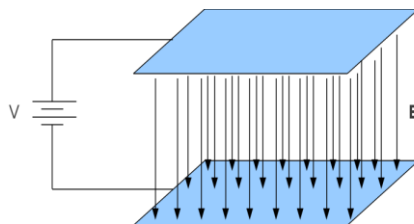
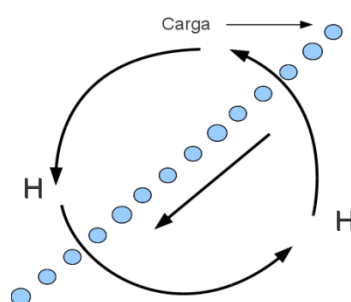


Figura 2.2 – Campo elétrico gerado pela diferença de potencial entre duas placas metálicas.

## 2.2 Campo magnético

Anteriormente foi mostrado que as cargas estacionárias produzem o campo elétrico. Todavia se essas cargas movem-se com um velocidade uniforme, um segundo efeito passa a existir. Trata-se do fenômeno do magnetismo.

Para melhor ilustrar esse fenômeno vale mencionar a lição de BASTOS (2003, p. 31), ao supor que a carga ou o arranjo de cargas mostrado na Fig. 2.1 não são estacionários no espaço, mas se movem a uma determinada velocidade. Nesse caso uma intensidade de campo magnético **H** é gerada, conforme mostrado na Fig. 2.3.



*Figura 2.3 – Um movimento de cargas e o campo magnético gerado.*

Segundo o referido autor “esse movimento de carga ou cargas leva à idéia de corrente elétrica, que resulta no vetor de campo **H**”. E segue discorrendo que: “Quando esse movimento de cargas ocorre no interior de um fio condutor a intensidade do campo elétrico é praticamente não existente, desde que os elétrons se movam entre posições vazias dentro dos átomos do material condutor e a soma das cargas seja essencialmente zero.”.

## 2.3 Grandezas derivadas

Assumido que as noções de carga elétrica e corrente elétricas são conhecidas, passamos discorrer sobre outras grandezas decorrentes dos vetores campo elétrico e magnético. Para isso seguimos o magistério de BASTOS (2003, p.31-36)

Considerando **B** um vetor de campo, podemos definir um fluxo  $\Phi$  atravessando uma superfície **S**

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.1)$$

O fluxo  $\Phi$  é chamado fluxo magnético e **B** é chamado de densidade de fluxo

magnético.

A permeabilidade  $\mu$  de um material expressa a capacidade intrínseca do material e indica a susceptibilidade à passagem do fluxo magnético. Para mostrar o significado de  $\mu$ , de forma bem simples, introduzimos a relação

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (2.2)$$

Considerando dois meios com geometrias idênticas, mas com diferentes permeabilidades  $\mu_1$  e  $\mu_2$ , de forma que  $\mu_1 > \mu_2$ , como mostrado na Fig. 2.4. Supondo que externamente é criado um campo magnético  $\mathbf{H}$  em ambos os materiais e que  $\mathbf{H}$  é constante ao longo da secção transversal  $S$ . Então

$$\mathbf{B}_1 = \mu_1 \cdot \mathbf{H} \text{ e } \mathbf{B}_2 = \mu_2 \cdot \mathbf{H} \quad (2.3)$$

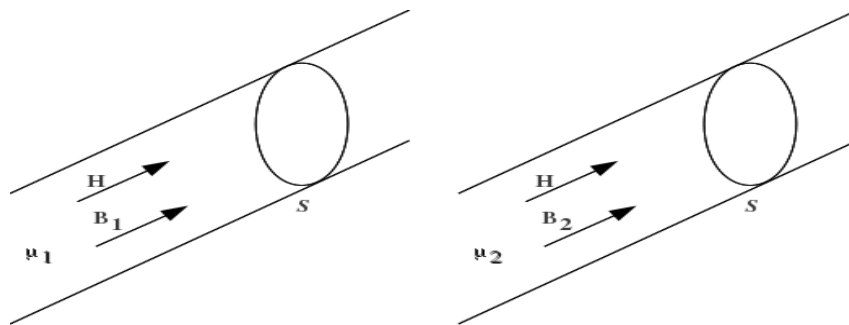


Figura 2.4 – Dois materiais de diferentes permeabilidades mantêm diferentes densidades de fluxo para a mesma intensidade de campo.

Os fluxos  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$  são:

$$\Phi_1 = B_1 \cdot S = \mu_1 H S \quad (2.4)$$

$$\Phi_2 = B_2 \cdot S = \mu_2 H S \quad (2.5)$$

onde  $B_1$  e  $B_2$  são as magnitudes de  $\mathbf{B}_1$  e  $\mathbf{B}_2$  perpendiculares a  $S$ , e constantes.

Obtém-se então

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (2.6)$$

Nota-se que quanto maior é a permeabilidade do meio, maiores são a densidade do fluxo magnético e o fluxo que passa pela sua secção transversal. Em outras palavras,  $\mathbf{B}$  é chamado de “densidade de fluxo magnético” ou “indução”, que expressa a capacidade de induzir fluxo dentro do meio. Assim como no exemplo anterior, uma grande densidade de

fluxo é associada com uma alta permeabilidade  $\mu$ . Utilizando o significado literal dos termos “indução” e “permeabilidade”, pode-se dizer que um grande fluxo é “induzido” no meio e que o meio é altamente “permeável” ao fluxo. A permeabilidade do ar é  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Henry/metro.

Seguindo nas lições de BASTOS (2003, p. 31-36), passamos agora a discorrer sobre outros dois conceitos importantes: indução elétrica  $\mathbf{D}$  e permissividade elétrica  $\epsilon$ .

Há uma relação paralela entre os pares  $\mathbf{D}$ ,  $\epsilon$  e  $\mathbf{B}$ ,  $\mu$ , mostrados anteriormente. Apesar das similaridades com as grandezas magnéticas, existem diferenças marcantes entre elas. A primeira diferença é o fato de que  $\epsilon$  varia pouco entre materiais, em contraste com a permeabilidade  $\mu$ . Em materiais dielétricos usuais  $\epsilon$  varia não mais do que por um fator de 100, enquanto que a variação em  $\mu$  pode muitas vezes atingir fatores da ordem de  $10^4$  ou mais. Uma segunda observação é que, em geral, quando da solução de problemas com campos elétricos e densidades de fluxo elétrico, estaremos especialmente interessados na intensidade de campo elétrico, enquanto que no caso magnético a intensidade de fluxo magnético assume uma papel predominante na análise do fenômeno. A permissividade do ar é  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Farad/metro.

A densidade superficial de corrente  $\mathbf{J}$  é outro conceito importante para o estudo dos campos elétricos e magnéticos.

Considere um condutor em linha reta com secção transversal uniforme área  $S$  e uma corrente atravessando a secção transversal na direção indicada na Fig. 2.5a.

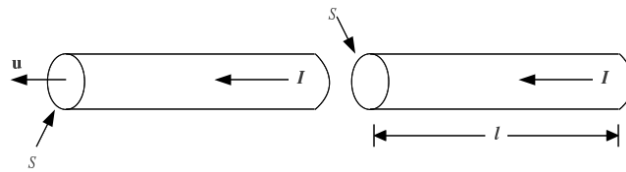


Figura 2.5a - Condutor reto. Figura 2.5b - Dimensões do condutor.

Definimos um vetor  $\mathbf{u}$  perpendicular à superfície  $S$ . A densidade de corrente superficial média que atravessa a área  $S$  é dada por

$$J = \frac{I}{S} \quad (2.7)$$

Assumindo que a superfície  $S$  é pequena, a densidade de corrente  $J$  pode ser considerada constante sobre a superfície. Definindo um vetor que tem magnitude igual a  $\mathbf{J}$  e direção dada por  $\mathbf{u}$

$$\mathbf{J} = \mathbf{u} J \quad (2.8)$$

O cálculo do fluxo de  $\mathbf{J}$  atravessando a superfície  $S$  define a corrente  $I$ , pela equação

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.9)$$

onde  $dS$  é a área diferencial. Em muitos casos  $\mathbf{J}$  varia por toda secção transversal.

Outra definição importante é a densidade volumétrica de carga  $\rho$ . Assumido-se que um número de cargas  $Q$  ocupam um volume  $Vol$ , uma densidade volumétrica de carga é definida como

$$\rho = \frac{Q}{Vol} \quad (2.10)$$

Uma distribuição não uniforme de cargas pode ser levada em conta observando-se que

$$Q = \int_{Vol} \rho \cdot dv \quad (2.11)$$

onde  $dv$  é o volume diferencial.

De maneira geral, quando da análise de problemas de campos elétricos distingue-se dois tipos de materiais: os dielétricos (ou materiais isolantes) e os materiais condutores. Materiais isolantes são caracterizados por sua permissividade  $\epsilon$ . Materiais condutores são caracterizados pela sua condutividade  $\sigma$ , que expressa a capacidade de conduzir corrente elétrica. Definimos então a relação

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.12)$$

que é a lei de Ohm aplicada a um ponto ou na forma local. No caso de de um condutor linear de comprimento  $l$  e secção transversal de área  $S$ , como na Fig. 2.5b, essa expressão assume a forma familiar mostrada a seguir.

Vimos anteriormente que

$$J = \frac{I}{S} \quad (2.7)$$

e afirmamos que o campo elétrico neste caso é

$$\mathbf{E} = \frac{V}{l} \quad (2.13)$$

onde  $V$  é a diferença de potencial elétrico nessa secção do condutor.

Substituindo essas duas relações na equação  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$  teremos



$$\frac{I}{S} = \frac{\sigma V}{l} \quad (2.14)$$

ou

$$V = \frac{lI}{\sigma S} \quad (2.15)$$

onde  $\frac{l}{\sigma S}$  é a resistência  $R$  do condutor. Agora temos que  $V = R I$  que é a lei de Ohm na forma mais comum. A diferença entre essas duas formas de expressar a lei de Ohm é que a primeira,  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ , é uma expressão na “forma local”. Ela define a grandeza em qualquer ponto do espaço. Por outro lado, na forma  $V = R I$ , é necessário introduzir das dimensões do condutor ( $S$  e  $l$ ) fazendo assim a forma “integral” da lei de Ohm.

A relação,  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ , assim como  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  e  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$  são chamadas de equações constitutivas ou relações constitutivas e são usadas adicionalmente às chamadas equações de Maxweel.

## 2.4 Unidades de medida

As unidades de medidas usualmente utilizadas para as grandezas elétricas e magnéticas são as do Sistema Internacional (SI), que serão apresentadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Unidades do Sistema Internacional para grandezas elétricas e magnéticas.

| Grandeza                                  | Símbolo          | Nome                       |
|---|------------------|----------------------------|
| Tensão elétrica (V)                       | V                | Volts                      |
| Intensidade de corrente elétrica (I)      | A                | Ampere                     |
| Resistência Elétrica (R)                  | $\Omega$         | Ohm                        |
| Intensidade de campo elétrico (E)         | V/m              | Volts por metro            |
| Intensidade de campo magnético (H)        | A/m              | Amperes por metro          |
| Densidade de campo elétrico (D)           | C/m <sup>2</sup> | Couloms por metro quadrado |
| Densidade de campo magnético (B)          | T                | Tesla                      |
| Permissividade elétrica ( $\varepsilon$ ) | F/m              | Farad por metro            |
| Permeabilidade magnética ( $\mu$ )        | H/m              | Henry por metro            |

No sistema SI de unidades o campo magnético é dado em Teslas [ 1 tesla (T) = 1 weber/metro<sup>2</sup> (1 wb/m<sup>2</sup>) ]. Uma vez que um Tesla é relativamente grande, o campo magnético é usualmente dado no sistema cgs de unidades em Gauss (G), onde 1 T = 10<sup>4</sup> G.

O vetor campo magnético, aqui designado por  $\mathbf{B}$ , é também referido como *indução magnética*, ou *densidade de fluxo magnético*. Ele deve ser distinguido da intensidade de campo magnético  $\mathbf{H}$  (onde  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ), o que é bem diferente, mas algumas vezes pode ser referido como campo magnético. No sistema SI a unidade de  $\mathbf{H}$  é ampere por metro. A

unidade oersted (Oe) do sistema cgs é frequentemente utilizada para  $\mathbf{H}$ , onde 1 A/m é igual a  $4\pi \cdot 10^{-3}$  Oe.

O fluxo magnético  $\Phi$  que atravessa uma área  $S$  normal às linhas de  $\mathbf{B}$  é definido por  $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$ . No sistema SI a unidade de  $\Phi$  é o weber (Wb), e no sistema cgs é o maxwell (Mx), onde 1 Wb =  $10^8$  Mx.

## 2.5 As equações de Maxweel

Assumido como conhecidos os operadores matemáticos rotacional, divergente e diferencial parcial no tempo, simbolizados respectivamente por  $rot$ ,  $div$  e  $\frac{\partial}{\partial t}$ , passamos a apresentar as equações de Maxweel, que são um conjunto de equações diferenciais parciais no espaço e no tempo que descrevem relações entre as grandezas de campos baseadas nas propriedades elétricas e magnéticas dos materiais ( $\epsilon$ ,  $\mu$  e  $\sigma$ ):

$$rot \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$div \mathbf{B} = 0 \quad (2.17)$$

$$rot \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.18)$$

$$div \mathbf{D} = \rho \quad (2.19)$$

Partindo-se dessas equações, podemos definir uma quinta relação. Aplicando o operador divergente nos dois lados de (2.16)

$$div (rot \mathbf{H}) = div \mathbf{J} + div \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.20)$$

ou, usando o fato de que  $div (rot \mathbf{H}) = 0$ , teremos que

$$0 = div \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial t} (div \mathbf{D}) \quad (2.21)$$

Utilizando a Eq. (2.19)

$$div \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.22)$$

Esta equação é chamada de equação de continuidade elétrica. Observa-se que, em geral,  $\partial \rho / \partial t$  é zero e, portanto, normalmente obtém-se  $div \mathbf{J} = 0$ . Isto é significativo na medida em que o fluxo do vetor, ou, da mesma forma, a corrente de condução é conservativa. Em outras palavras, a corrente entrando em um determinado volume é igual à corrente que deixa-o.

A equação  $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t$  expressa a maneira pela qual um campo magnético pode criar uma divisão em corrente de condução (associado com  $\mathbf{J}$ ) e uma variação temporal da densidade de fluxo elétrico (associado com  $\partial \mathbf{D} / \partial t$ ). Assumimos primeiramente a situação da Figura 2.6, onde há densidade de fluxo elétrico ou, alternativamente, a densidade de fluxo elétrico é constante no tempo.

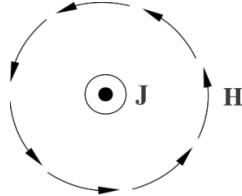


Figura 2.6 - Relação entre densidade de corrente e intensidade de campo magnético.

Nesta primeira situação teremos a equação  $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$ , ou seja,  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{J}$  são ligados por uma relação rotacional. Assim o fluxo do vetor  $\mathbf{J}$  é a corrente de condução, que é o termo dominante da relação, enquanto que o termo  $\partial \mathbf{D} / \partial t$  é relativamente pequeno.

A equação  $\text{div } \mathbf{B} = 0$  significa que o fluxo magnético é conservativo. Para entender isso podemos dizer que o fluxo magnético que entra em um volume é igual ao fluxo magnético que deixa o volume. Esta relação corresponde a uma condição que permite a compreensão do comportamento do campo e serve, em vários casos, como um meio adicional para determinar a intensidade do campo magnético. No entanto, a Eq. (2.16) também estabeleceu uma relação entre a intensidade do campo magnético  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{J}$ , a mesma relação permite a determinação de  $\mathbf{H}$  como uma função de  $\mathbf{J}$  em um grande número de casos práticos.

A equação  $\text{rot } \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t$  é análoga à Eq. (2.16), mostrando que a derivada temporal da densidade de fluxo magnético é capaz de gerar uma intensidade de campo elétrico  $\mathbf{E}$ .

A situação geométrica ligando essas grandezas é mostrada na Figura 2.7. Assumindo que  $\mathbf{B}$  aumenta à medida que sai do plano da figura, a intensidade de campo elétrico  $\mathbf{E}$  está na direção ali mostrada.

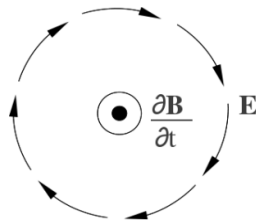


Figura 2.7 - Relação entre a derivada temporal da densidade de fluxo magnético e intensidade de campo elétrico.

A equação  $\text{div } \mathbf{D} = \rho$  demonstra que o fluxo do vetor  $\mathbf{D}$  não é conservativo. Podemos facilmente imaginar um volume no qual há uma diferença entre o fluxo elétrico entrando e saindo desse volume. Essa situação é mostrada na Figura 2.8, onde uma carga elétrica está localizada no centro de uma esfera. O fluxo que atravessa o volume é orientado para fora.  $\mathbf{D}$  e  $\rho$  são relacionados através do operador divergente. A relação geométrica entre as duas grandezas é mostrada na Figura 2.8. O fluxo do vetor  $\mathbf{D}$  atravessando a superfície que envolve o volume  $V$  da esfera é diferente de zero.

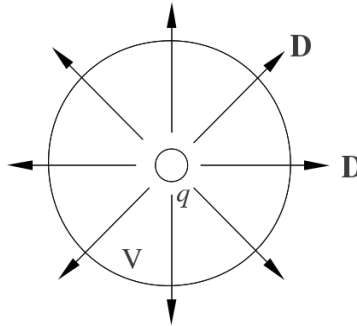


Figura 2.8 - A natureza do fluxo elétrico.

Com base nas equações de Maxweel verifica-se que os campos elétricos e magnéticos são acoplados, ou seja, se um é conhecido, o outro pode ser calculado. Todavia, dependendo do problema a ser solucionado, esses campos podem ser determinados com se fossem desacoplados. É o caso dos campos próximos às linhas de transmissão de energia elétrica, para os quais as variações lentas com o tempo permite simplificações que desacoplam as equações de Maxweel, possibilitando os cálculos a partir das equações da quase-estática.

As Figuras 2.9 e 2.10 ilustram os campos elétrico e magnético produzidos por uma linha de transmissão de energia elétrica.

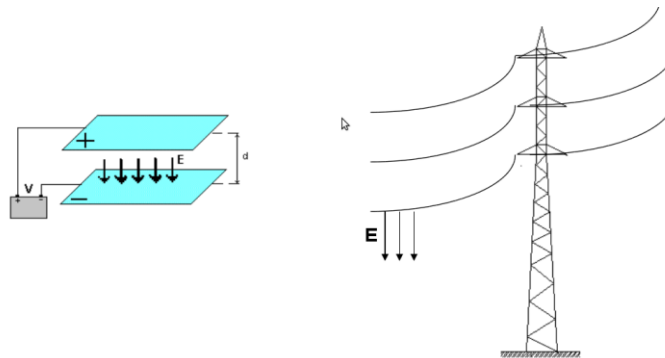


Figura 2.9 – Campo elétrico produzido por uma linha de transmissão.

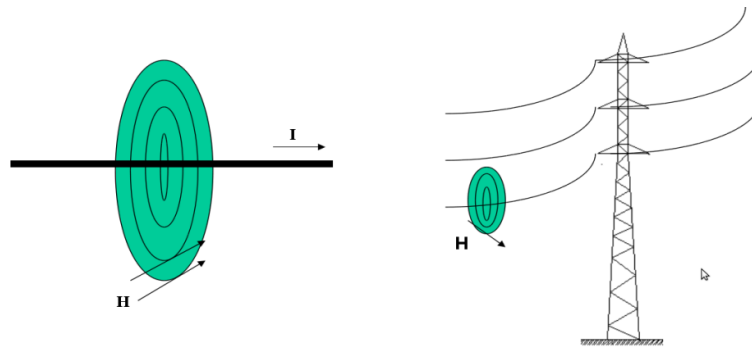


Figura 2.10 – Campo magnético produzido por uma linha de transmissão.

## Capítulo 3

# LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

O sistema brasileiro de produção e transmissão de energia elétrica apresenta características que permitem considerá-lo único em âmbito. Trata-se de um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários.

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas uma pequena parcela da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica.

Visando a uma melhor compreensão do assunto a ser percorrido faz-se necessário uma breve explanação sobre o sistema de energia elétrica, para em seguida iniciar-se a abordagem sobre as linhas de transmissão no Sistema Interligado Nacional.

### 3.1 Noções gerais sobre o sistema de energia elétrica

Inicialmente é importante ressaltar o objetivo de um sistema de energia elétrica. Para isso destacamos Elgerd (1976, p. 1):

O objetivo de um sistema de energia elétrica pode ser posto em poucas palavras: ele deve gerar energia em quantidades suficientes e nos locais mais apropriados, transmiti-las em grandes quantidades aos centros de carga e então distribuí-las aos consumidores individualmente, em forma e quantidade apropriada, e com o menor custo ecológico e econômico possível.

Do que foi explanado, compreende-se que um sistema de energia elétrica é dividido em *produção, transmissão e distribuição*.

Destaca-se também que na busca desse objetivo deve-se observar aspectos ecológicos e de economicidade

Vale citar o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2002, p. 105), para mostrar a grande importância das linhas de transmissão no Brasil:

Como já mencionado, o Sistema Elétrico Nacional é fortemente dependente de energia hidráulica, e os melhores potenciais hidrelétricos do país não estão localizados próximos dos grandes centros consumidores. Outros fatores importantes são a grande extensão territorial e as variações climáticas e hidrológicas do país, o que tende a gerar excedentes de produção hidrelétrica em determinadas regiões e períodos do ano. Dessa forma, a transmissão de grandes quantidades de energia elétrica e a interligação do sistema são fundamentais para o suprimento de eletricidade no país.

O referido Atlas apresenta a seguir um melhor detalhamento da *transmissão*:

Tradicionalmente o sistema de transmissão é dividido em redes de transmissão e subtransmissão, em razão, em razão do nível de desagregação do mercado consumidor. A rede primária é responsável pela transmissão de grandes ‘blocos de energia, visando ao suprimento de grandes centros consumidores e à alimentação de eventuais consumidores de grande porte. A rede secundária – subtransmissão – é basicamente uma extensão da transmissão, objetivando o atendimento de pequenas cidades e consumidores industriais de grande porte. A subtransmissão faz a realocação dos grandes blocos de energia, recebidos de subestações de transmissão, entre as subestações de distribuição [Eletrobrás, 2000 b].

Merece destaque ainda a distinção entre as referidas redes, pelo que continuamos a citação do Atlas de Energia Elétrica do Brasil:

No entanto, a distinção entre as referidas redes é dificultada pelas características do sistema, que apresenta vários níveis de tensão e está sempre em evolução. A rede de transmissão é caracterizada pelas linhas de tensão igual ou superior a 230 kV, e a de subtransmissão, por linhas de tensão entre 69 kV, e 138 kV. Essa classificação não é rígida, de forma que há linhas de transmissão de 138 kV, buscando das continuidade de fluxo, no caso de contingências em linhas de tensão superior paralelas a elas [Eletrobrás, 2000 b]

Com isso, passamos a compreender que a *transmissão* é constituída de linhas de transmissão que estão associadas ao transporte de grandes quantidades de energia elétrica e a elevadas distâncias.

Seguindo o sentido do fluxo de energia elétrica (geração-consumo), após as linhas de transmissão, e antes da *distribuição*, existem as linhas de *subtransmissão*, que têm como objetivo repartir a energia, com uma *tensão elétrica* reduzida após passar por outros equipamentos transformadores de energia elétrica; são as chamadas *subestações de subtransmissão*. Daí em diante, a energia elétrica é levada aos diversos centros de consumo, como, por exemplo, um conglomerado urbano ou uma área industrial, onde a *tensão elétrica* é novamente reduzida por meio de outros equipamentos transformadores de energia elétrica; são as *subestações de distribuição*.

Essa energia é normalmente transportada sob a forma de *corrente alternada* (C.A.), mas já existe tecnologia para que esse transporte seja feita em *corrente contínua* (C.C.), conforme

William D. Stevenson Jr (1978, p. 2):

A primeira linha de transmissão de transmissão em C.A. dos Estados Unidos foi posta em funcionamento em 1890; ela transportava a energia elétrica gerada em uma usina hidroelétrica desde Willamette Falls até Portland, Oregon, percorrendo uma distância de 20 km.

Durante quase 10 anos uma linha de transmissão experimental em corrente contínua esteve em funcionamento entre Schenectady e Mechanicville, no Estado de New York, cobrindo uma distância de 27 km.

Atualmente estudos mostram que um sistema aéreo de transmissão C.C. não é econômico atualmente nos Estados Unidos para distâncias inferiores a 560 km. Na Europa, onde em geral as linhas de transmissão são muito mais longas do que as do Estados Unidos, existem linhas em C.C. operando em várias localidades, quer instalações aéreas quer em subterrâneas.

Por fim, entendemos que a *distribuição* é a responsável por levar a energia elétrica das *subestações de distribuição* até os consumidores finais, de maneira segura e com qualidade. Nessa etapa está presente também a responsabilidade do fornecedor pelo fornecimento do serviço de energia elétrica.

A ANEEL desenvolveu um sistema informatizado de informações do sistema elétrico brasileiro. O *Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico - SIGEL* foi concebido com a expectativa de tornar-se um instrumento de referência na busca de informações consistentes, de caráter geral, relativas às atividades fins do setor, tornando disponível, consolidados em um mesmo ambiente computacional, dados e informações disseminadas em vários subsistemas isolados de interesse corporativo, desenvolvidos interna ou externamente. A ANEEL espera que esse sistema possa evoluir para o que seria o Portal do Setor Elétrico Nacional, onde todos os seus integrantes, sejam eles públicos ou da área privada, teriam direitos e obrigações, no sentido de consultar, alimentar e manter atualizado um banco de dados unificado sobre todas as atividades correlatas ao setor, respeitadas as atribuições e responsabilidades institucionais de cada parceiro. Embora esteja em processo de aprimoramento, o sistema já disponível na rede mundial de computadores no endereço eletrônico <http://sigel.aneel.gov.br/>.

Atualmente a linha de transmissão com maior nível de tensão alternada operando no Brasil é de 750 kV, transportando parte da energia gerada na hidroelétrica de Itaipu para o sudeste brasileiro.

Também transportando energia para a região sudeste está em operação uma linha de transmissão de 600 kV em corrente contínua.



### 3.2 Setor elétrico brasileiro

Ao longo dos últimos anos o setor elétrico brasileiro passou por mudanças estruturais em sua regulamentação, a exemplo do que ocorreu em diversos países de todo o mundo. O objetivo foi o estabelecimento de um modelo de máxima eficiência econômica, caracterizado pela existência de um ambiente competitivo, que viabilizasse investimentos em expansão e garantisse o atendimento ao mercado consumidor, conforme os critérios de confiabilidade e qualidade estabelecidos pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

No período de 2002 a 2005 foram introduzidas alterações na estrutura regulatória do setor elétrico brasileiro que deram novo formato às atividades de compra e venda de energia, bem como às iniciativas de entrada de grandes consumidores no mercado de energia elétrica. Observou-se também uma tendência ao fortalecimento do Governo, no que tange às decisões estratégicas do setor, através das ações do MME e criação da EPE - Empresa de Pesquisa Energética.

Atualmente o modelo institucional do setor elétrico brasileiro pode ser representado pelo diagrama da Figura 3.1:

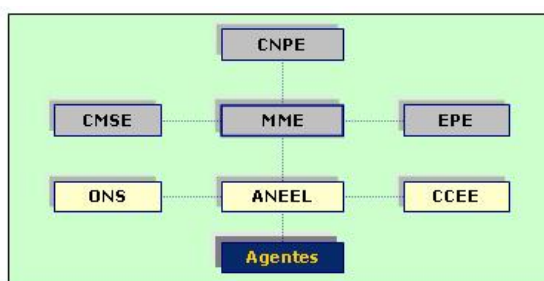


Figura 3.1 – Modelo institucional do setor elétrico brasileiro

As atribuições gerais de cada órgão são apresentadas a seguir:

- **CNPE** - Conselho Nacional de Política Energética: Criado pela Lei nº 9.478/1997, vinculado à Presidência da República e presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia, responsável pela homologação da política energética, em articulação com as demais políticas públicas.
- **MME** - Ministério de Minas e Energia: Órgão de governo responsável pela formulação e implementação de políticas para o setor de energia, de acordo com as diretrizes do CNPE.

- **CMSE** - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico: Criado pela Lei nº 10.848/2004, no âmbito do Poder Executivo e sob sua coordenação direta, com a função precípua de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional
- **EPE** - Empresa de Pesquisa Energética: Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, criada pela Lei nº 10.847/2004, tendo por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.
- **ANEEL** - Agência Nacional de Energia Elétrica: Autarquia em regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, criada pela Lei nº 9.427/1996, tendo como atribuições: regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica, atendendo reclamações de agentes e consumidores com equilíbrio entre as partes e em benefício da sociedade; mediar os conflitos de interesses entre os agentes do setor elétrico e entre estes e os consumidores; conceder, permitir e autorizar instalações e serviços de energia; garantir tarifas justas; zelar pela qualidade do serviço; exigir investimentos; estimular a competição entre os operadores e assegurar a universalização dos serviços.
- **ONS** - Operador Nacional do Sistema: Pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, autorizada por meio do Decreto Presidencial nº 5.081/2004, nos termos do art. 13 da Lei nº 9.648/1998, tem a responsabilidade de executar as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional - SIN, sob a fiscalização e regulação da ANEEL.
- **CCEE** - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica: Pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, criada pela Lei nº 10.848/2004, sob autorização do Poder Concedente e regulação e fiscalização pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, com a finalidade de viabilizar a comercialização de energia elétrica, administrando os contratos, as liquidações do mercado de curto prazo e os leilões de energia.
- Agentes – Concessionários, permissionários e autorizados da prestação dos

serviços de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil.

Neste contexto destaca-se a Resolução nº 66 da ANEEL, publicada em 16 de abril de 1999, que estabeleceu a composição da Rede Básica de Transmissão, suas conexões e as respectivas empresas proprietárias das instalações de transmissão. Em síntese, a chamada Rede Básica compreende o conjunto dos equipamentos de transmissão que operam em níveis de tensão igual ou superior a 230 kV.

A identificação das necessidades de transmissão da Rede Básica é determinada pela EPE, por meio dos documentos denominados *Programa de Expansão da Transmissão* (PET) e Plano Decenal, bem como pelo ONS, através do *Plano de Ampliações e Reforços* (PAR). Com base nessa identificação, consolidada pelo Ministério de Minas e Energia (MME), a ANEEL prepara as licitações das novas instalações de transmissão.

### **3.3 Normas específicas para linhas de transmissão de energia elétrica**

Conforme foi dito, as linhas de transmissão estão associadas ao transporte de energia elétrica em grandes distâncias e em elevadas quantidades. Pelo primeiro fato, e tendo em vista os obstáculos naturais e a necessidade de aplicação eficiente dos recursos financeiros, objetiva-se dar a elas um percurso que resulte na menor extensão possível, e nessa busca projetistas e construtores são levados a estabelecer traçados que atravessam áreas de concentração humana, porém devem ser observadas as normas específicas do setor elétrico, bem como a legislação ambiental.

Mesmo que não existisse a possibilidade de ocorrências de choques elétricos, o que é de fato é um risco bem reduzido, o certo é que ainda assim a população fica exposta às ondas ou campos eletromagnéticos gerados pelas elevadas quantidades de energia que passam nessas linhas de transmissão.

Atualmente a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a instituição oficial responsável pela normatização das distâncias mínimas dos condutores das linhas de transmissão ao solo, bem como o dimensionamento da largura da faixa de passagem de linhas de transmissão, a chamada faixa de servidão. Nesse sentido destaca-se a Norma Brasileira NBR nº 5422/1985, que fixa as condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica com tensão máxima, valor eficaz fase-fase, acima de 38 kV e não superior a 800 kV, de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações

em instalações próximas.

Em relação à operação das linhas de transmissão, a Resolução Normativa nº 191/2005 da ANEEL estabelece os procedimentos para a determinação da capacidade operativa das instalações de transmissão integrantes da Rede Básica.

Atualmente um novo regulamento deve ser observado na construção de linhas de transmissão. Trata-se da Resolução Normativa nº 398/2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica, que dispõe sobre os limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, na frequência de 60 Hz. Vale ressaltar que mesmo antes da publicação da referida resolução a ANEEL já fazia constar nos editais de leilões de linhas de transmissão o cumprimento de recomendações internacionais sobre esse assunto.

### 3.3.1 Norma Brasileira NBR nº 5422/1985

A Norma Brasileira NBR 5422, que trata do projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, especifica as condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão, de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações próximas.

Dentre outras coisas, a norma estabelece as distâncias mínimas que os condutores e acessórios energizados devem manter das demais partes da própria linha de transmissão, do terreno ou obstáculos próximos. São distâncias de segurança que tem a finalidade evitar a ocorrência de curto-circuito pela aproximação excessiva com os cabos energizados das linhas de transmissão.

A distância dos cabos da linha de transmissão ao solo é influenciada pelo comprimento das cadeias de isoladores, do valor das flechas máximas dos condutores, bem como das alturas de segurança necessárias e da própria geografia do solo. O comprimento da cadeia de isoladores depende da composição de isoladores e ferragens. Já as flechas máximas são estabelecidas em função do comprimento do vão entre as torres da linha, bem como, do tipo de cabo condutor utilizado.

Outro fator a ser observado é a tração a que os condutores da linha devem ser submetidos. Isso porque essa tração deve ficar limitada às características de resistência do

condutor. De acordo com a NBR-5422 em seu item 5.2.2, a tração deve ser calculada para a condição de máxima temperatura do condutor.

As alturas de segurança ( $h_s$ ) mostradas na Figura 3.2 representam a menor distância admissível entre condutores e o solo em qualquer momento da vida da linha. São fixadas igualmente pela NBR-5422, em seu item 10.2.1.1.

Dependendo da classe de tensão da linha e da natureza do terreno ou dos obstáculos por ela cruzados, a referida norma apresenta dois métodos de cálculo dessas distâncias. Um método designado como convencional e um método alternativo, que para sua aplicação depende de uma análise probabilística dos valores máximos das sobretensões a que a linha poderá ser submetida.

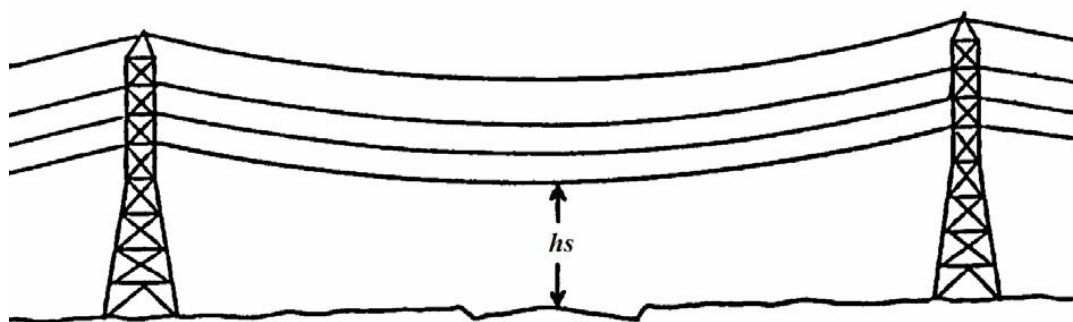


Figura 3.2 – Menor distância do condutor ao solo (ABNT, 1985).

O projeto de uma linha de transmissão aérea também leva em consideração algumas condições especiais relacionadas à aproximação de outros objetos com os cabos elétricos. Essas condições podem ocorrer, por exemplo, quando a linha de transmissão atravessa uma rodovia, haja vista o tráfego de caminhões com alturas elevadas. Também existem outras condições relacionadas à movimentação de tratores agrícolas e da própria vegetação nas proximidades dessas instalações.

Para cálculo da altura mínima dos condutores a NBR 5422 dispõe de um método convencional, dado pela seguinte expressão matemática:

$$h_s = a + 0,01 \left( \frac{D_u}{\sqrt{3}} - 50 \right), \text{ para } V > 87 \text{ kV}$$

ou

$$h_s = a, \text{ para } V \leq 87 \text{ kV}$$

(3.1)

Sendo

$V$  – tensão máxima de operação da linha, valor eficaz, fase-fase, em kV;

$Du$  – distância, em metros, numericamente igual a  $V$ .

$a$  – distância básica, em metros, obtida da Tabela 3.1, seu valor depende do tipo de obstáculo.

Tabela 3.1 – Distância básica (ABNT, 1985).

| Região ou obstáculo atravessado pela linha ou que ela se aproxime | Distância básica (a) |
|---|----------------------|
| Locais acessíveis apenas a pedestres                              | 6                    |
| Locais onde circulam máquinas agrícolas                           | 6,5                  |
| Rodovias, ruas e avenidas   | 8                    |
| Ferrovias não eletrificadas                                       | 9                    |
| Ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação          | 12                   |
| Suporte de linha pertencente a ferrovia                           | 4                    |
| Águas navegáveis  | H +2,0               |
| Águas não navegáveis  | 6                    |
| Linhas de energia elétrica  | 1,2                  |
| Linhas de telecomunicação   | 1,8                  |
| Telhados e terraços   | 4                    |
| Paredes   | 3                    |
| Instalações transportadoras                                       | 3                    |
| Veículos rodoviários e ferroviários                               | 3                    |

As distâncias mínimas dos condutores ao solo estão fortemente relacionadas à segurança. O nível de campo elétrico depende da distância do objeto ao condutor. Assim, conforme essa distância diminui, a intensidade do campo elétrico aumenta.

Outro fator a ser observado no projeto de linhas de transmissão aéreas é a chamada Faixa de Servidão.

Segundo Oliveira (2006), a Faixa de Servidão se define como as áreas de terra ao longo do eixo da linha de transmissão, cujo domínio permanece com o proprietário, porém com restrições ao uso da área.

A definição dessa faixa é importante para delimitar o espaço onde os técnicos responsáveis pela manutenção da linha poderão ter livre acesso, impondo restrições ao acesso

da população em geral, além de servir de referência para medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos.

A Faixa de Servidão somente passa a ser parte integrante do serviço público de energia elétrica com sua Declaração de Utilidade Pública, que hoje se dá por meio de um processo administrativo da Agência Nacional de Energia, conforme Resolução Normativa nº 279, de 11 de setembro de 2007. É constituída ao longo do eixo da linha de transmissão e determinada em função de suas características elétricas e mecânicas necessárias para garantir o bom desempenho do empreendimento, bem como para a realização de inspeções e manutenções, visando assegurar a segurança das instalações e de terceiros.

A largura da Faixa de Servidão é determinada com base na largura mínima da faixa de segurança, definida na Norma Brasileira NBR-5422, da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

São considerados vários fatores no cálculo da Faixa de Servidão, sendo os principais: o balanço e a deflexão dos cabos, o campo elétrico e o campo magnético, ruído audível exercido pela tensão energética e interferência nas ondas de rádio.

Em seu trabalho denominado *Análise da Legislação Ambiental na Faixa de Servidão de Linha de Transmissão da Energia no Estado de Santa Catarina*, publicado nos anais do *Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário* realizado em 2008 na cidade de Florianópolis, Boscato *et al.* (2008) exemplifica algumas larguras de Faixa de Servidão estabelecidas pela Eletrosul Centrais Elétricas S/A, relacionando a largura da faixa com a tensão da rede: 30 metros para linhas de 69 e 138 kV; 50 metros para linhas de 230 kV e 65 metros para linhas de 500 kV. Observa-se que quanto maior a tensão de operação, maior é a largura da faixa de servidão.

De acordo com o item 12 da Norma Brasileira NBR-5422, no caso de uma única linha, a largura mínima da faixa de segurança, e por conseguinte da Faixa de Servidão, é dada pela expressão:

$$L = 2.(b+d+D) \quad (3.2)$$

onde,

b é distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado deste eixo;

$d$  é soma das projeções horizontais da flecha do condutor e do comprimento da cadeia de isoladores, após seu deslocamento angular devido à ação do vento;

$D$  é igual  $D_U/150$ , no mínimo igual a 0,5 m

$D_U$  é tensão máxima de operação da linha, em kV .

A Figura 3.3 mostra uma linha de transmissão com os parâmetros  $L$ ,  $b$ ,  $d$  e  $D$ .

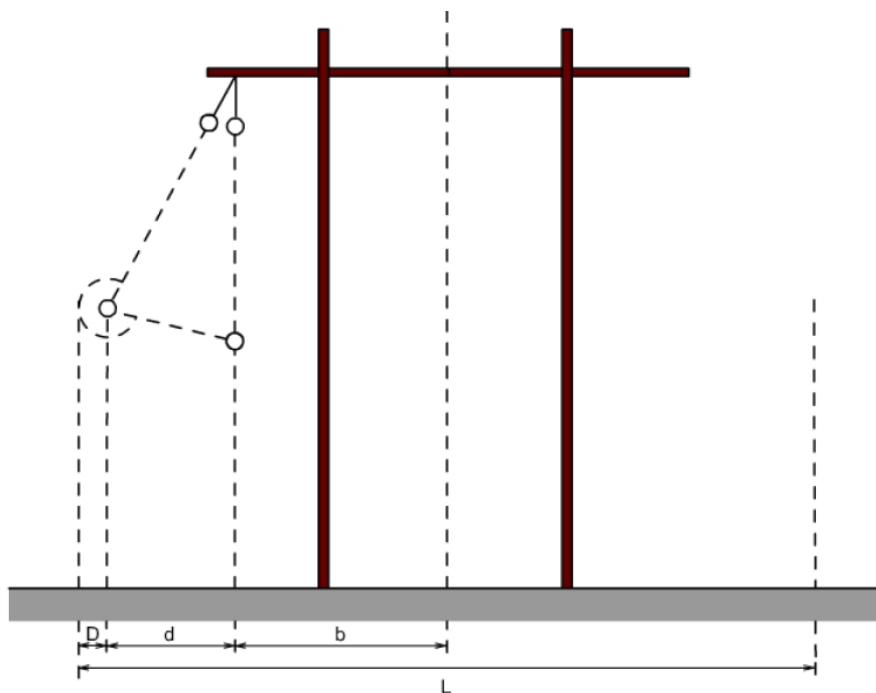


Figura 3.3 - Parâmetros para cálculo da faixa de servidão de uma linha de transmissão.

### 3.3.2 Resolução Normativa nº 191/2005 da ANEEL

Trata-se de uma norma a ser seguida por todos os agentes de transmissão que operam na rede básica e demais instalações de transmissão pertencentes ao sistema interligado nacional (SIN).

A premissa básica dessa resolução é o fato que as instalação vinculadas ao serviço de transmissão, projetadas em conformidade com as normas técnicas brasileiras ou, na sua falta, com as normas internacionais, devem ser capazes de manter a continuidade do serviço prestado em regime normal de operação e durante emergências, não colocando em risco vidas humanas ou integridade dos equipamentos.



A resolução dispõe sobre os níveis de carregamento de linhas de transmissão e de transformadores para operação em condições de carregamento normal de longa duração e regime de operação de curta duração, para emergências.

Vale ressaltar que os níveis de carregamento das linhas de transmissão refletem diretamente na intensidade dos campos magnéticos gerados por essas instalações.

## Capítulo 4

# METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Foi visto no capítulo anterior que um condutor energizado tem a capacidade de gerar campos elétricos e magnéticos, e que esses campos estão relacionados à tensão elétrica e ao movimento de cargas elétricas (corrente elétrica), respectivamente. Tendo em vista que as linhas de transmissão de energia elétrica podem ser resumidas a condutores submetidos a altas tensões elétricas para o transporte de grandes blocos de energia (movimento de cargas elétricas), aplica-se a elas esse mesmo princípio, qual seja, a geração de campos elétricos e magnéticos.

Quando energizados, os condutores das linhas de transmissão apresentam diferenças de potencial entre si e o solo. No momento da energização os condutores absorvem da fonte a energia necessária para o seu carregamento. As linhas são então carregadas com cargas elétricas distribuídas ao longo dos condutores e sendo a tensão senoidal, a carga elétrica nos cabos em um ponto qualquer varia de acordo com valores instantâneos das diferenças de potencial aí existentes entre condutores ou entre o condutor e o solo.

Para o estudo de uma linha de transmissão é importante mostrar uma formulação específica para uma distribuição de cargas em uma linha. Para SHADIKU (2004) a linha de transmissão pode ser resumida a uma distribuição linear de carga infinita.

No capítulo anterior foram mostradas as formulações matemáticas para os campos elétricos e magnéticos. Apesar de o enfoque ter sido dado à eletrostática, o mesmo estudo pode ser direcionado a uma linha de transmissão devido à baixa frequência do sistema.

Para o cálculo, ao nível do solo, dos campos elétricos e magnéticos de uma linha aérea de transmissão de energia elétrica, dois fatores devem ser observados: um é perfil do solo ao longo do traçado da linha e o outro as flechas formadas pelos condutores. O fato é que o traçado de uma linha aérea de transmissão de energia elétrica está sujeito aos mais diversos tipos de acidentes geográficos, fazendo com que as distâncias entre os condutores e o solo

variem ao longo do percurso. Acrescente-se a isso as flechas formadas pelos condutores, que nada mais são do que as envergaduras dos condutores esticados provocadas pelos pesos dos mesmos.

Outro fator importante a ser observado para o cálculo dos campos elétricos e magnéticos é a disposição geométrica dos condutores da linha de transmissão.

É sabido que as formas de ondas das tensões e das correntes elétricas em cada uma das fases são senoidais defasadas no tempo. Assim em um certo ponto do espaço os componentes dos campos elétricos e magnéticos associados a cada fase apresentam diferentes módulos e fases.

Na literatura técnica sobre o assunto existem diversos trabalhos científicos sobre cálculos dos campos elétricos e magnéticos gerados por uma linha de transmissão. Destacamos a dissertação de mestrado de Gernan Edson Guimarães, da Universidade Federal de Minas Gerais, com o título de *Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV* (2005), cuja seção sobre procedimento de cálculos foi seguida para o desenvolvimento do presente trabalho.

Deno (1996) demonstrou que em um certo ponto no espaço a soma vetorial dos componentes dos campos elétricos e magnéticos de cada fase podem gerar um vetor de campo girante de módulo variável com o tempo que desenha uma elipse para cada ciclo das tensões e correntes nos condutores, como mostrado esquematicamente na Figura 4.1.

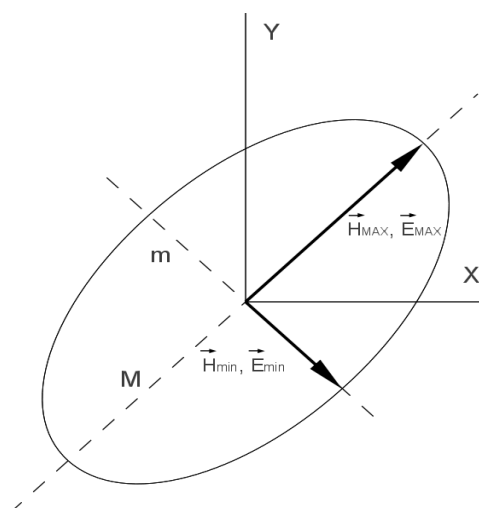


Figura 4.1 – Representação do campo elétrico e magnético através da elipse.

Seguindo no estudo de Deno (1996), o módulo e a direção do semi-eixo maior da elipse, dado por  $M$  na Figura 4.1, indica a intensidade e a direção do campo máximo. De modo similar, o módulo e a direção do semi-eixo menor, dado por  $m$  na Figura 4.1, indica a intensidade e a direção do campo mínimo, conforme as seguintes equações:

$$E_R = \sqrt{E_{MAX}^2 + E_{min}^2} \quad (4.1)$$

$$H_R = \sqrt{H_{MAX}^2 + H_{min}^2} \quad (4.2)$$

onde  $E_{MAX}$  e  $H_{MAX}$  são os valores r.m.s. dos semi-eixos maiores e  $E_{min}$  e  $H_{min}$  são os valores dos semi-eixos menores dos campos elétrico e magnético elípticos, respectivamente. Decorre dessa relação que as resultantes  $E_R$  e  $H_R$  serão sempre maiores ou iguais a  $E_{MAX}$  e  $H_{MAX}$  e que se os campos forem linearmente polarizados, ou seja,  $E_{min} = 0$  e  $H_{min} = 0$ , teremos  $E_R = E_{MAX}$  e  $H_R = H_{MAX}$ .

Ainda de acordo com Deno (1996) os campos elétricos e magnéticos gerados por uma linha aérea de transmissão em um certo ponto do espaço podem ser representados por uma componente espacial vertical e outra horizontal com partes real e imaginária ou módulo e ângulo. O módulo do campo resultante é determinado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos módulos de cada componente espacial, conforme as seguintes equações:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (4.3)$$

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (4.4)$$

onde  $E_x$  e  $H_x$  são os componentes horizontais e  $E_y$  e  $H_y$  os componentes verticais.

De forma que os objetivos deste trabalho sejam satisfatoriamente atendidos, optou-se pelo cálculo do campo resultante por meio das componentes vertical e horizontal, conforme as equações (4.3) e (4.4). Isto porque para fins de incidência dos campos elétricos e magnéticos na superfície de um corpo ao nível no solo, a componente da terceira dimensão espacial não faria sentido. Ressalte-se ainda que dessa forma o campo resultante será sempre maior ou igual ao campo máximo, o que dá uma característica conservadora ao resultado final, além de proporcionar simplicidade aos cálculos.

Limites de exposição humana aos campos elétricos e magnéticos têm sido recomendados por várias organizações internacionais, podendo cada país adotar aquela que lhe for mais conveniente. Dessa forma torna-se importante o conhecimento da intensidade dos campos elétrico e magnético na vizinhança de linhas áreas de transmissão de energia elétrica para a comparação com os limites adotados. Para isso abre-se duas alternativas para a caracterização desses campos: medição ou cálculos. No caso de linhas de transmissão em operação as duas opções podem ser realizadas. Por outro lado, na fase de projeto só resta a realização de cálculos, o que é de fundamental importância para um bom planejamento do sistema elétrico, tendo em vista as restrições ambientais.

#### 4.1 Cálculo do campo magnético

Conforme foi dito anteriormente, neste trabalho utilizaremos uma modelagem em duas dimensões, considerando os condutores como linhas paralelas à superfície do solo.

Considerando um plano cartesiano com condutor da linha de transmissão perpendicular ao plano XY, conforme Figura 4.2, o campo magnético  $H_{j,i}$  no ponto  $(X_j, Y_j)$ , a uma distância  $r_{i,j}$  do condutor conduzindo uma corrente  $I_i$  tem amplitude:

$$H_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \quad (4.5)$$

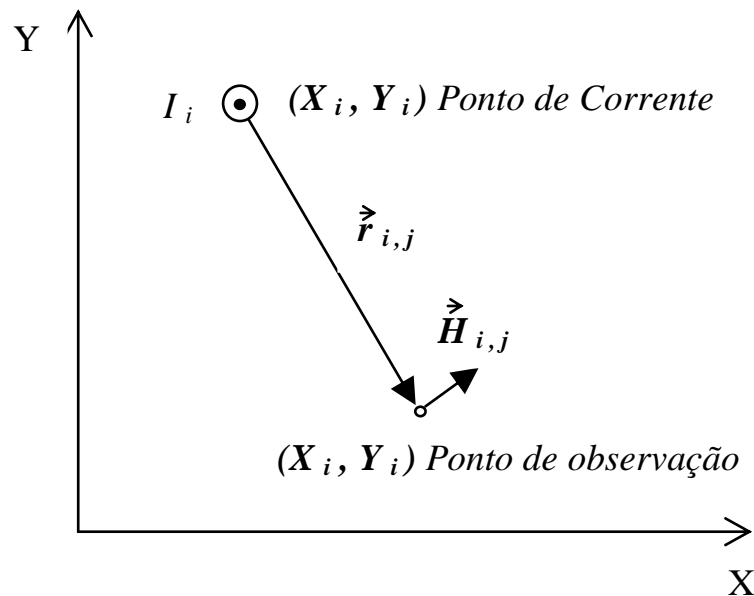


Figura 4.2 – Sistema de coordenadas para cálculo de campo magnético.

Em termos vetoriais podemos expressar o campo magnético como:

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\Phi}_{i,j} \quad (4.6)$$

onde  $\vec{\Phi}_{i,j}$  é o vetor unitário na direção do elemento  $I_i \cdot dl$  pelo segmento  $\vec{r}_{i,j}$ . Este vetor unitário é expresso por:

$$\vec{\Phi}_{i,j} = -\frac{y_i - y_j}{r_{i,j}} \vec{u}_x + -\frac{x_i - x_j}{r_{i,j}} \vec{u}_y \quad (4.7)$$

onde  $\vec{u}_x$  e  $\vec{u}_y$  são vetores unitários na direção horizontal e vertical, respectivamente.

Para o caso de n condutores, o campo magnético total será a soma das contribuições de todos os condutores  $i$ :

$$\vec{H}_j = \sum_i^n \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\Phi}_{i,j} \quad (4.8)$$

A densidade de fluxo magnético é:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.9)$$

Os pontos de correntes considerados para o cálculo do campo magnético ou densidade de campo magnético em um determinado ponto a cima do solo nas proximidades de uma linha aérea de transmissão são as correntes do condutores, as correntes induzidas nos para-raios e objetos metálicos sobre a linha de transmissão e as correntes de retorno pelo solo. Um fator de correção é indicado no *Transmission Line Reference Book* (1982) para considerar a corrente de retorno pelo solo. A adição desse fator na equação (4.8) resulta em:

$$\vec{H}_j = \sum_i^n \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\Phi}_{i,j} - \frac{I_i}{2\pi r'_{i,j}} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{2}{\gamma r'_{i,j}} \right) \right] \vec{\Phi}'_{i,j} \quad (4.10)$$

sendo

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (4.11)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade do solo e  $\epsilon$  a permissividade elétrica. A distância  $r'_{i,j}$  é um número complexo:

$$r'_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + \left( y_i + y_j + \frac{2}{\gamma} \right)^2} \quad (4.12)$$

O vetor unitário é:

$$\vec{\Phi}'_{i,j} = - \left[ \frac{Y_i + Y_j + 2/\gamma}{r'_{i,j}} \right] \vec{u}_x + \frac{X_i - X_j}{r'_{i,j}} \vec{u}_y \quad (4.13)$$

O resultante do campo magnético é portanto um valor complexo.

De acordo com o referido *Transmission Line Reference Book* (1982), é importante considerar o retorno pelo solo para calcular o campo magnético para distâncias superiores a 100 metros da linha de transmissão, sendo a Eq. (4.8) suficiente para calcular o campo magnético para distâncias inferiores.

Segundo Liu *et al* (2002), a contribuição dos cabos pára-raios pode ser considerada desprezível haja vista que ficam mais distantes do solo e terem pequenas correntes induzidas. Para os fins do presente trabalho foram considerados apenas os cabos de fases como ponto de corrente.

Para uma linha aérea de transmissão composta de condutores paralelos ( $i = a, b, \dots, n$ ) sobre um solo perfeitamente plano, pode-se calcular a densidade de fluxo magnético resultante em um ponto N de coordenadas  $(X_n, Y_n)$  no espaço, conforme Figura 4.3, onde a densidade de fluxo magnético devido à corrente no condutor a é:

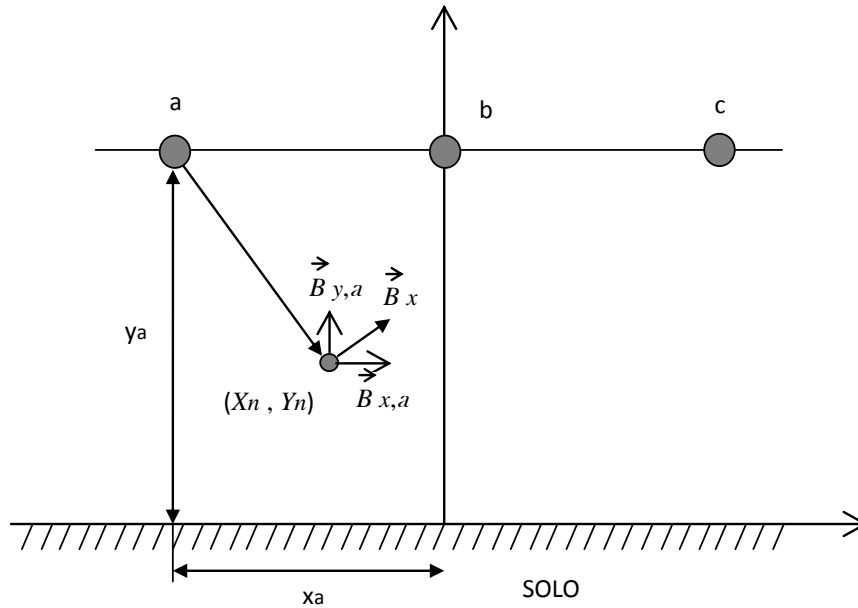


Figura 4.3 – Representação dos condutores da linha de transmissão para o cálculo de fluxo magnético em um ponto N.

$$B_a = B_{x,a} \vec{u}_x + B_{y,a} \vec{u}_y \quad (4.14)$$

onde  $\vec{u}_x$  e  $\vec{u}_y$  são os vetores unitários horizontal e vertical, respectivamente, e  $B_{x,a}$ ,  $B_{y,a}$  são dados por:

$$B_{x,a} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \left\{ \frac{-(Y_n - Y_a)}{[(X_a - X_n)^2 + (Y_a - Y_n)^2]} - \frac{(Y_n + Y_a)}{[(X_a - X_n)^2 + (Y_a + Y_n)^2]} \right\} \quad (4.15)$$

$$B_{y,a} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \left\{ \frac{-(X_n - X_a)}{[(X_a - X_n)^2 + (Y_a - Y_n)^2]} - \frac{(X_n + X_a)}{[(X_a - X_n)^2 + (Y_a + Y_n)^2]} \right\} \quad (4.15)$$

As componentes horizontal e vertical,  $B_x$  e  $B_y$ , da densidade de fluxo magnético são calculadas pela somatória de todas as contribuições de todos os condutores (a, b, ..., n)

$$B_x = B_{x,a} + B_{x,b} + \dots + B_{x,n}$$

$$B_y = B_{y,a} + B_{y,b} + \dots + B_{y,n} \quad (4.16)$$

Cada uma dessas componentes é um fasor, expresso pelas partes real e imaginária, e o módulo da densidade de fluxo magnético resultante de cada componente é dado por

$$B_x = \sqrt{B_{x,r}^2 + B_{x,i}^2} \quad e$$

$$B_y = \sqrt{B_{y,r}^2 + B_{y,i}^2} \quad (4.17)$$

A densidade de fluxo magnético resultante total é:

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (4.18)$$

## 4.2 Cálculo do campo elétrico

Para o cálculo do campo elétrico gerado por apenas um condutor, considera-se uma distribuição linear de carga ao longo do eixo X, em um sistema de coordenadas cartesianas, conforme Figura 4.4.

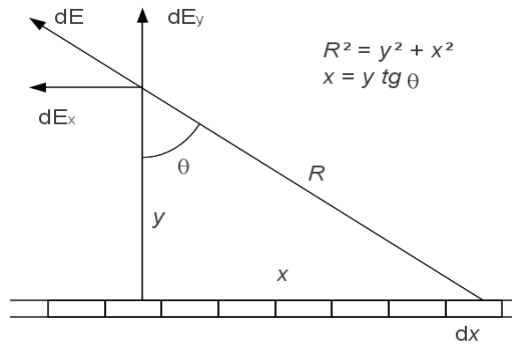


Figura 4.4 – Distribuição linear de carga ao longo um condutor.



Para uma linha de transmissão constituída por um determinado arranjo de condutores com potenciais quaisquer, assume-se que na situação de equilíbrio a carga fica distribuída na superfície dos mesmos. Dessa forma, cada um desses condutores será considerado uma carga fixa, sendo que o campo elétrico em um determinado ponto sob a linha de transmissão será o resultado das contribuições individuais.

De acordo com o *Transmission Line Reference Book* (1982), para o cálculo do campo elétrico de uma linha de transmissão com condutores dispostos em um geometria simples, pode-se considerar uma única linha de carga, simplificando os cálculos.

Cada condutor de uma linha de transmissão pode ser caracterizado para efeito do cálculo de campo elétrico, por um potencial representado por uma parte real e outra imaginária, e pelo seu diâmetro. As cargas contidas nos condutores podem ser determinadas através do seu potencial e pelos correspondentes coeficientes de potenciais de Maxwell.

As cargas representativas de cada condutor da linha de transmissão, matriz  $[Q]$ , são obtidos através do produto da matriz  $[V]$  dos potenciais nos condutores pelo inverso da matriz  $[P]$  dos coeficientes do potencial de Maxwell, conforme a seguir:

$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad (4.19)$$

Para uma linha de transmissão composta de condutores paralelos ( $i = a, b, \dots, n$ ) sobre um solo perfeitamente plano, conforme a Figura 4.5, Os elementos da matriz  $[P]$  são dados pelas equações a seguir:

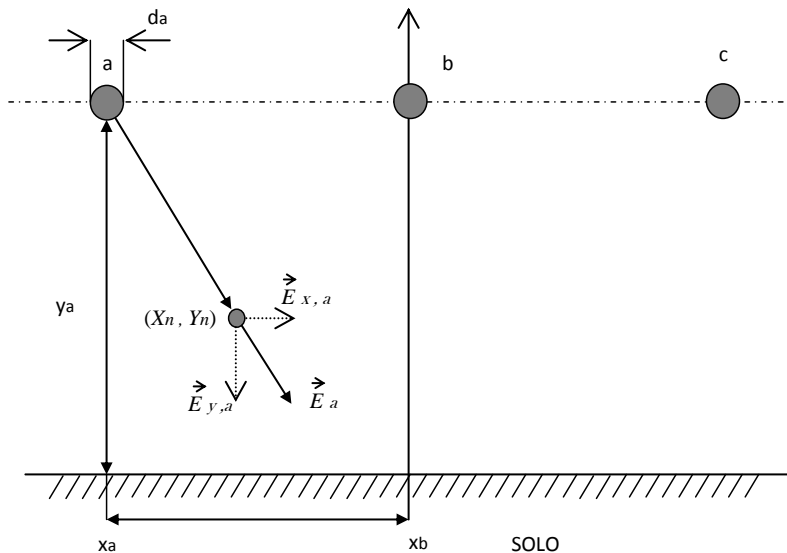


Figura 4.5 – Representação dos condutores da linha de transmissão para o cálculo do campo elétrico em um ponto  $n$

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left( \frac{4Y_a}{d_a} \right) \quad \text{e} \quad (4.20)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left( \frac{(X_a - X_b)^2 + (Y_a + Y_b)^2}{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.21)$$

Onde:

$Y_a$  é a distância vertical do condutor  $a$  ao solo,

$Y_b$  é a distância vertical do condutor  $b$  ao solo,

$X_a$  é a a posição horizontal do condutor  $a$  em relação ao eixo da linha de transmissão,

$X_b$  é a a posição horizontal do condutor  $b$  em relação ao eixo da linha de transmissão,

$d_a$  é o diâmetro do condutor  $a$ .

$\epsilon$  é a permissividade do ar, assumido o valor de 8,854 pF/m

Para um feixe de condutores pode-se considerar o diâmetro equivalente utilizando-se a seguinte fórmula:

$$d_{eq} = D \sqrt[n]{\frac{n \cdot d}{D}} \quad (4.22)$$

onde:

$D$  é o diâmetro do feixe;

$n$  é o número de subcondutores; e

$d$  é o diâmetro dos subcondutores.

A matriz coeficiente de potencial de Maxwell  $[P]$  é composta de números reais, enquanto que o vetor coluna contendo os potenciais dos condutores  $[V]$  é composto por números complexos. Conseqüentemente o vetor coluna contendo as cargas nos condutores  $[Q]$  é constituído por números complexos, com isso, pode-se separar a Eq. (4.19) em outras duas equações, uma contendo a parte real e a outra a parte imaginária, conforme equações a seguir:

$$[Q_r] = [P]^{-1}[V_r] \quad \text{e} \quad [Q_i] = [P]^{-1}[V_i] \quad (4.23)$$

Uma vez determinadas as cargas para cada um dos condutores através da Eq. (4.19), calcula-se o campo elétrico devido a cada condutor em um ponto  $n$  de coordenadas  $(X_n, Y_n)$

no espaço, onde o campo elétrico devido à carga no condutor  $a$  e para sua imagem no solo é:

$$\vec{E}_a = E_{x,a}\vec{u}_x + E_{y,a}\vec{u}_y \quad (4.24)$$

onde  $\vec{u}_x$  e  $\vec{u}_y$  são os vetores unitários horizontal e vertical, respectivamente, e  $E_{x,a}$ ,  $E_{y,a}$  são dados por:

$$E_{x,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(X_n - X_a)}{2\pi\epsilon_0[(X_a - X_n)^2 + (Y_a - Y_n)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(X_n - X_a)}{2\pi\epsilon[(X_a - X_n)^2 + (Y_a + Y_n)^2]} \quad (4.25)$$

$$E_{y,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(Y_n - Y_a)}{2\pi\epsilon_0[(X_a - X_n)^2 + (Y_a - Y_n)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(Y_n - Y_a)}{2\pi\epsilon[(X_a - X_n)^2 + (Y_a + Y_n)^2]} \quad (4.26)$$

Onde:

$Y_a$  – Coordenada vertical do condutor  $a$  em relação ao solo, em metros;

$Y_n$  – Coordenada vertical do ponto  $N$ , em metros;

$X_a$  – Coordenada horizontal do condutor  $a$ , em metros;

$X_n$  – Coordenada horizontal do ponto  $N$ , em metros.

As componentes horizontal  $E_x$  e vertical  $E_y$  são obtidas a partir da soma das contribuições de cada condutor da linha de transmissão (a, b, c,...n):

$$E_x = E_{x,a} + E_{x,b} + E_{x,c} + \dots + E_{x,n} \quad (4.27)$$

$$E_y = E_{y,a} + E_{y,b} + E_{y,c} + \dots + E_{y,n} \quad (4.28)$$

Cada componente vertical e horizontal do campo elétrico é constituído por uma parte real e imaginária:

$$\vec{E}_x = E_{rx} + jE_{ix} \quad (4.29)$$

$$\vec{E}_y = E_{ry} + jE_{iy} \quad (4.30)$$

O módulo do campo resultante de cada componente é dado por:

$$E_x = \sqrt{E_{rx}^2 + E_{ix}^2} \quad (4.31)$$

$$E_y = \sqrt{E_{ry}^2 + E_{iy}^2} \quad (4.32)$$

O campo elétrico resultante é dado por:

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (4.33)$$

## Capítulo 5

# EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Os campos eletromagnéticos estão presentes em nosso cotidiano. A expansão dos sistemas elétricos e de telecomunicações tem aumentado cada vez mais a incidência dos mesmos sobre a população, daí a importância que deve ser dada aos estudos sobre seus efeitos na saúde humana. Por outro lado os campos eletromagnéticos são largamente utilizados na área médica para o diagnóstico de doenças, bem como para o tratamento de patologias específicas, principalmente do câncer. Tudo isso aponta para a necessidade de estudos para se analisar os efeitos da interação entre os campos eletromagnéticos e o corpo humano.

Neste capítulo serão apresentados os resultados de alguns estudos epidemiológicos sobre exposição humana a campos elétricos e magnéticos, bem como as principais recomendações nacional e internacional.

### 5.1 Campos eletromagnéticos de baixa frequência e possíveis efeitos adversos à saúde humana

Desde o final do século passado existe uma grande preocupação com os possíveis efeitos adversos das ondas eletromagnéticas para a saúde humana, o que tem despertado a comunidade científica a se aprofundar no assunto. Nesta seção apresentaremos os resultados de algumas pesquisas científicas sobre o assunto, bem como as recomendações nacional e internacional.

Em seu trabalho denominado *Revisão Bibliográfica sobre efeitos adversos dos campos eletromagnéticos à saúde humana*, o Professor Tomás Nunes Cavalcante Neto (2005), do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, faz um excelente histórico sobre a situação das pesquisas mundiais sobre este assunto, avaliando os efeitos realmente comprovados e aceitos pela comunidade científica.

Do referido trabalho destaca-se que “os primeiros estudos publicados sobre os perigos da radiação eletromagnética originada por campos elétricos de baixa frequência surgiram na

União Soviética em 1972.”. A motivação desses estudos decorria do fato que de “os cientistas observaram uma ocorrência maior de cefaléia e cansaço em pessoas que permaneciam sob constante radiação, por residirem ou trabalharem junto a linhas de distribuição de energia elétrica.”.

Embora ainda seja um assunto bastante polêmico, registra o autor do trabalho que “alguns cientistas defendem a tese que a exposição prolongada a campos eletromagnéticos pode causar depressão psíquica ou até mesmo provocar a redução dos glóbulos vermelhos e o aumento dos glóbulos brancos, favorecendo o surgimento de um câncer.”.

O autor registrou vários estudos científicos que tiveram como objetivo avaliar a associação entre campos eletromagnéticos e desenvolvimento de patologias em pessoas que convivem nas proximidades de redes elétricas.

Destaca-se um estudo realizado por Tynes e Haldorsen (1997) na Noruega, cujo resultado não apontou associações estatisticamente significativas para leucemias, tumores de cérebro e linfomas:

Tynes e Haldorsen (1997) realizaram um estudo caso-controle com crianças de 0 a 14 anos, com 523 casos de câncer e 2112 controles, onde a exposição foi determinada, principalmente, em base a estimativas dos campos magnéticos derivadas da média anual da carga histórica do sistema elétrico da Noruega. Não foram observadas associações estatisticamente significativas para leucemias, tumores de cérebro e linfomas, ao se utilizar essas estimativas, assim como ao se considerar a distância entre as linhas de eletricidade e a residência da criança.

O trabalho do Professor Tomás destaca também outros três estudos que buscavam relacionar os campos eletromagnéticos e o desenvolvimento de câncer de mama. Um deles foi conduzido por Feychting *et al* (1998), com 699 casos de câncer de mama, considerando como expostas as mulheres cujas intensidades de campos magnéticos calculadas para a residência eram de 0,2  $\mu$ T ou mais. Um outro estudo foi conduzido por London *et al* (2003) em Los Angeles, Estados Unidos, no qual foram considerados 347 casos e 286 controles, e realizado em todas as residências ocupadas nos 10 últimos anos antes do diagnóstico, através da medição dos campos magnéticos efetuada durante um período de 7 dias. Shoenfeld *et al* (2003) conduziram um estudo de caso em Long Island, Estados Unidos, no qual a determinação da exposição foi efetuada com base em uma série de medidas pontuais e de 24 horas dos CEM, medições da intensidade dos campos magnéticos subterrâneos e entrevista, onde todas as participantes tinham 15 ou mais anos de residência no mesmo domicílio

Sobre tais estudos o Professor Tomás discorre nos seguintes termos:

As evidências dos estudos epidemiológicos sobre câncer de mama e exposição residencial a CEM são ainda limitadas. Dos três estudos considerados, em apenas um foi observado um excesso de risco associado a essa exposição, limitado a mulheres abaixo de 50 anos, sendo essa possível associação mais forte em mulheres positivas para receptores de estrogênio. Entretanto, nesse estudo, não se dispunha de informações sobre importantes fatores de risco para essa neoplasia, como, por exemplo, idade na primeira gestação, paridade, e outras.

Na parte conclusiva do referido trabalho o Professor Tomaz Nunes Cavalcante Neto (2005, p.18, grifo original) cita um artigo de revista especializada, nos seguintes termos:

Em recente artigo publicado na Edição de junho de 2005 pela Revista Eletricidade Moderna, José de Melo Camargo, da AES Eletropaulo e da ABRICEM, concluía: *‘Em que pese uma pequena parcela de estudos epidemiológicos sugira uma associação entre a exposição, especialmente ao campo magnético e a ocorrência de alguns tipos de câncer em crianças, adultos e trabalhadores ocupacionalmente expostos, essa associação é extremamente fraca, e não pôde ser satisfatoriamente explicada até o momento, pelos fundamentos teóricos existentes de interação entre esse tipo de campo e os organismos vivos. Esses estudos não são conclusivos, sendo ainda bastante contraditórios com a grande maioria dos estudos epidemiológicos disponíveis sobre essa questão, que não vem encontrando quaisquer associações [...].*

Com isso, observa-se que, apesar da não comprovação científica, não está descartada a hipótese de efeitos adversos dos campos eletromagnéticos à saúde humana.

## **5.2 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)**

Dentre as organizações internacionais ligados à questão da exposição humana aos campos elétricos e magnéticos destaca-se a *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP*.

De acordo com informações divulgadas do sítio da organização na rede mundial de computadores, “o principal objetivo da *ICNIRP* é divulgar informações e recomendações sobre os potenciais perigos à saúde decorrentes da exposição a radiações não-ionizantes a todos com interesse no assunto”. E segue noticiando que “as informações e recomendações da *ICNIRP* abrangem todas as radiações não-ionizantes, inclusive, as radiações ópticas (ultravioleta, visível e infravermelho - e lasers), radiação de campos elétricos e magnéticos estáticos variantes no tempo ...”. Importante destacar que “muitas das informações fornecidas pela *ICNIRP* são publicadas sob a forma de avaliações e relatórios científicos e atas de reuniões científicas”. E finalmente vale ressaltar que “os resultados dessas avaliações combinada com avaliações de risco realizadas em colaboração com a Organização Mundial de Saúde, OMS, resultam em publicações de diretrizes sobre exposição feitas pela *ICNIRP*”.

Uma das principais publicações da *ICNIRP* é a *Guidelines for Limiting Exposure to*

*Time Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic fields (up to 300 GHz)*. Com base nesse documento a ICNIRP recomenda os seguintes limites, ou *níveis de referências*, para campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo na frequência de 50 e 60 Hz, para o público em geral: 4,17 kV/m para o campo elétrico e 83,33 $\mu$ T para o campo magnético.

A seguir são apresentadas as premissas utilizadas na publicação do *Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic fields (up to 300 GHz)* que resultaram nos limites

### 5.2.1 *Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic fields*

De acordo com o *Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, as restrições foram baseadas em dados puramente científicos; entretanto, os conhecimentos disponíveis indicam que essas restrições promovem um nível adequado de proteção à exposição de campos eletromagnéticos variantes no tempo. São apresentadas duas classes:

*Restrições Básicas:* As restrições à exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos que baseados diretamente nos efeitos à saúde são chamadas de *Restrições Básicas*. Dependendo da frequência dos campos, as grandezas físicas utilizadas para especificar essas restrições são a densidade de corrente (**J**), a taxa de absorção de específica (SAR) e a densidade de potência (S). Somente a densidade de potência no ar, fora do corpo, pode ser prontamente medida na exposição individual.

*Níveis de Referência:* Esses níveis são obtidos para o propósito da avaliação prática da exposição para determinar se as *restrições básicas* possam ser excedidas. Alguns *níveis de referência* são derivados de relevantes *restrições básicas* utilizando-se medições e/ou técnicas computacionais, e algumas percepções direcionadas e efeitos adversos indiretos da exposição a campos eletromagnéticos.

Desses conceitos extrai-se que os limites de exposição a campos elétricos e magnéticos (*níveis de referência*) são estabelecidos a partir das *restrições básicas* fundamentadas em grandezas físicas correlacionadas aos efeitos biológicos da exposição.

Para a frequência de 50 e 60 Hz, a grandeza utilizada para especificar tais restrições é a densidade de corrente, uma vez que na faixa de frequências de 4 Hz a 1 KHz, em níveis de intensidade de correntes induzidas superiores a 100 mA/m<sup>2</sup>, são excedidos os limiares para mudanças agudas na excitabilidade do sistema nervoso central e para outros efeitos agudos como a reversão do potencial evocado visualmente.

A partir disso foi estabelecido que a exposição ocupacional deve ser limitada a campos com densidades de corrente inferiores a 10 mA/m<sup>2</sup>, adotando-se um fator de segurança igual



a 10. Para o público em geral foi adotado o fator de segurança de 50, resultando em uma restrição básica para a exposição de  $2 \text{ mA/m}^2$ .

Em função da pouca disponibilidade de dados relacionando as correntes transitórias com efeitos na saúde, a Organização Mundial de Saúde recomenda que os valores indicados nas restrições para densidades de correntes induzidas por transitórios ou campos com picos de duração muito curta, sejam tomados como valores instantâneos e não como médias temporais.

### **5.3 Associação Brasileira de Compatibilidade Magnética (ABRICEM)**

Conforme cartilha informativa da Associação Brasileira de Compatibilidade Magnética - ABRICEM (2004), que se propõe a esclarecer dúvidas sobre questões relacionadas com linhas de transmissão de energia elétrica e exposição humana a campos elétricos e magnéticos, “não existem evidências científicas comprovadas, suficientemente fortes para que existam preocupações a esse respeito”. Referido informativo ainda alerta que “até o momento as pesquisas não estabeleceram nenhuma evidência científica comprovada, suficientemente forte para que existam preocupações a esse respeito”. E finalmente, “inúmeros estudos foram realizados sobre os mais diversos tipos de doença e nenhum deles comprovou que os campos elétricos e magnéticos causam danos a saúde”.

Ressalta-se a importante participação da ABRICEM no processo legislativo do Projeto de Lei nº 2.576, de 2000, da Câmara dos Deputados, que resultou na Lei nº 11.934/2009, que dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. No dia 24/11/2004 foi realizada uma audiência pública na Comissão de Ciência e Tecnologia, Comunicação e Informática (CCTCI) da Câmara dos Deputados, com a participação de vários especialistas, dentre eles estava o Sr. Álvaro de Matos Bartollo, representante da ABRICEM, ocasião em que “apresentou várias fórmulas matemáticas para demonstrar com números que a radiação na faixa de radiofrequências é não ionizante, pois não possui energia suficiente para provocar a mutação celular”

### **5.4 Outras recomendações**

No contexto de ausência de comprovação científica sobre os possíveis efeitos adversos dos campos eletromagnéticos na saúde humana surge o questionamento de qual seria a distância mínima a ser mantida entre as linhas de transmissão de energia elétrica como medida de precaução contra os possíveis efeitos maléficos dos campos eletromagnéticos por

elas gerados. Entendemos que o Poder Público tem o dever de propiciar os meios para que tal indagação seja esclarecida, o que também criaria os subsídios necessários visando à elaboração de normas específicas.

Destacamos uma recomendação citada por Carlos M. Requejo (1999, p. 113) em seu livro *Stres de Alta Tensión*. Com base um informativo denominado *Informe Karolinska*, recomenda-se que a distância de segurança para as linhas de transmissão de energia elétrica deve ser de pelo menos um metro para cada mil Volts de tensão. Dessa forma, para uma linha de 400 mil Volts, as residências devem localizar-se a mais de 400 metros da rede elétrica:

El peligro apuede estar fuera de nuestra vivienda; la existecia de torres de alta tensión cerca de la casa, como pasa em muchas urbanizaciones, es por sí misma um importante factor de riesgo. Según el Informe Karolinska, la distancia de seguridad debe ser, al menos, de um metro por cada 1.000 V de tensión en la línea; así para una línea de 400.000 V, las viviendas deben ubicarse a mása de 400 m del tendido eléctrico.

Destacamos também uma abordagem conhecida como “evitar por prudência”, proposta em 1989 por Morgan *at al.* (1989)s na *Carnegie Mellon University* para responder a preocupações do público sobre possíveis riscos de campos eletromagnéticos associados a linhas de transmissão, recomendando medidas a serem tomadas a um custo moderado, para reduzir a exposição da população, conforme publicação da revista *IEEE Technology and Society Magazine* de artigo intitulado *The Precautionary – Common Sense or Enviromental Extremism?* de Kenneth R. Foster do Departamento de Bioengenharia da Universidade da Pensilvânia, Philadelphia (2000, p. 2, grifo original)<sup>1</sup>:

O ‘evitar por prudência’ tem recebido aceitação limitada, sendo adotada por poucos estados (Califórnia, Colorado, Havaí, Nova Iorque, Ohio, Texas e Wiscosin) e por outros países (Austrália e Suécia). Como tem sido considerado por estados americanos, o ‘evitar por prudência’ permite mudanças no projeto de uma linha de transmissão; alguns reguladores estaduais (Califórnia, por exemplo), interpreta ‘custos modestos’ como menos de 5% de aumento no custo total de um projeto. Portanto, o ‘evitar por prudência’ daria suporte ao redirecionamento de linhas para longe de escolas e faseamento de condutores para minimizar campos eletromagnéticos fora da faixa de passagem de linhas, mas não a transformar as linhas em linhas subterrâneas, uma maneira efetiva, mas muito dispendiosa, de reduzir a exposição do público aos campos.

Verificou-se que a primeira recomendação é totalmente desprovida de um embasamento técnico e despreza os aspectos de economicidade. Para o exemplo citado, ou seja, linha de transmissão de 400 kV, seria necessário uma faixa de servidão em torno de 800 metros (400

---

<sup>1</sup> Tradução de Hamilton Moss, do Centro de Pesquisas em Energia Elétrica, Brasil, Grupo de Trabalho sobre Campos Eletromagnéticos. Kenneth R. Foster. *O Princípio da Precaução: Bom Senso ou Extremismo Ambiental*.

metros para cada lado), ou seja, quase um quilometro, o que acarretaria um custo altíssimo para fins de indenizações de terras particulares ao longo do traçado da linha de transmissão.

A segunda abordagem, denominada “evitar por prudência”, mostra um melhor embasamento técnico e econômico, além de levar em consideração a questão ambiental. Ressalte-se ainda o respaldo acadêmico do Departamento de Bioengenharia da Universidade da Pensilvânia.

## **5.5 Efeitos da Implantação de Linhas de Transmissão em Regiões Densamente Povoadas**

Em cumprimento à Resolução Normativa nº 185/2001 da ANEEL, que trata da realização de investimento em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, a Companhia Energética do Ceará (COELCE) desenvolveu projeto de pesquisa junto ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC denominado *Efeitos da Implantação de Linhas de Transmissão em Regiões Densamente Povoadas*, referente ao ciclo 2003/2005.

A principal motivação do projeto foi a grande controvérsia e a falta de informações das comunidades adjacentes às linhas de transmissão a respeito dos efeitos ocasionados pela implantação de linhas de transmissão, inclusive em relação à emissão de campos elétricos e magnéticos.

As medições de campo eletromagnético de baixa frequência foram realizadas de acordo com os procedimentos da norma 644 do IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) - Procedimentos Padrão para Medição de Campo Elétrico e Magnético de Frequência Industrial Criados por Linhas de Transmissão AC.

De acordo com esta norma, mediu-se, ao longo de uma linha transversal ao traçado da linha, a componente vertical do campo elétrico e o valor resultante do campo magnético.

Ressalta-se que os horários em que foram realizadas as medições não correspondem necessariamente aos períodos de maior carregamento do sistema, já que a maioria delas foi executada pela parte da manhã.

Por meio do medidor *Wandel & Goltermann EFA-300* foram realizadas medições de campos elétricos e magnéticos nas proximidades de 5 (cinco) linhas de 69 kV de tensão de linha da COELCE, selecionadas segundo os critérios de maior carregamento e com

localização em zonas densamente povoadas, tanto em zona urbana quanto em zona rural, todas identificadas na TABELA 5.1.

Tabela 5.1 - Linhas de 69 kV da COELCE selecionadas para as medições dos campos.

| <b>Linha de 69 kV</b>                | <b>Características</b>   |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Papicu – Água Fria                   | Urbana, Circuito Simples |
| Distrito Industrial II – Bom Sucesso | Urbana, Circuito Simples |
| Fortaleza – Distrito Industrial II   | Urbana, Circuito Duplo   |
| Fortaleza - Coluna                   | Rural, Circuito Duplo    |
| Coluna – Cascavel                    | Rural, Circuito Simples  |

A TABELA 5.2 apresenta os níveis máximos de campo elétrico medidos nas proximidades das linhas de 69 kV da COELCE, assim como uma comparação em termos percentuais em relação ao limite recomendado pela *ICNIRP* para a exposição do público em geral.

Tabela 5.2 - Níveis máximos de campo elétrico medidos nas proximidades das linhas.

| <b>Linha de 69 kV</b>                | <b>Campo Máximo [kV/m]</b> | <b>% do limite para o público</b> |
|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Papicu – Água Fria                   | 0,619                      | 14,9%                             |
| Distrito Industrial II – Bom Sucesso | 1,220                      | 29,3%                             |
| Fortaleza – Distrito Industrial II   | 1,060                      | 25,4%                             |
| Fortaleza - Coluna                   | 1,406                      | 33,7%                             |
| Coluna – Cascavel                    | 0,734                      | 17,6%                             |

A Tabela 5.3 apresenta os maiores valores de campo magnético encontrados, juntamente com uma comparação em termos percentuais em relação ao valor máximo recomendado pela *ICNIRP*, para a exposição do público em geral.

Tabela 5.3 - Níveis máximos de campo magnético medidos nas proximidades das linhas

| <b>Linha de 69 kV</b>                | <b>Campo Máximo [μT]</b> | <b>% do limite para o público</b> |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Papicu – Água Fria                   | 3,90                     | 4,7%                              |
| Distrito Industrial II – Bom Sucesso | 5,32                     | 6,4%                              |
| Fortaleza – Distrito Industrial II   | 7,36                     | 8,8%                              |
| Fortaleza - Coluna                   | 3,68                     | 4,4%                              |
| Coluna – Cascavel                    | 1,88                     | 2,3%                              |

O nível máximo de campo magnético foi obtido na linha Fortaleza - Distrito Industrial II, com um carregamento de 466 A, o maior dentre todas as demais linhas medidas.

Observou-se com isso que todos os valores de campo elétrico e magnético medidos

nas vizinhanças das linhas de transmissão da COELCE são muito inferiores aos níveis recomendados pelas diretrizes da *ICNIRP* para a exposição do público em geral.

Outra atividade prevista no escopo deste projeto foi a realização de medições de campos eletromagnéticos dentro de residências para que seja feita uma comparação dos níveis medidos com os campos encontrados nas proximidades das linhas de 69 kV COELCE.

Uma primeira parte do levantamento de campos eletromagnéticos em residências consistiu na medição de campos no interior de residências cearenses. As medições foram realizadas em 22 residências e estabelecimentos comerciais de Fortaleza situados próximos às linhas da COELCE.

O campo eletromagnético foi medido em 10 pontos no interior de cada residência. Foi utilizado o medidor de campo elétrico e magnético *Wandel & Goltermann EFA-300*, com filtro para integração do campo em frequências situadas entre 5 Hz e 2 kHz.

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados das medições realizadas no interior das residências. Para cada residência ou estabelecimento comercial, foi registrado o valor médio e o valor máximo dos campos elétrico e magnético. Os valores de campo elétrico, por serem muito baixos, estão expressos em V/m.

Tabela 5.4 – Campos medidos em residências no Ceará.

| Residência | Campo Magnético ( $\mu\text{T}$ ) |        | Campo Elétrico (V/m) |        | Residência | Campo Magnético ( $\mu\text{T}$ ) |        | Campo Elétrico (V/m) |        |
|------------|-----------------------------------|--------|----------------------|--------|------------|-----------------------------------|--------|----------------------|--------|
|            | Média                             | Máximo | Média                | Máximo |            | Média                             | Máximo | Média                | Máximo |
| 1          | 0,046                             | 0,103  | 2,69                 | 9,53   | 12         | 0,06                              | 0,072  | 12,78                | 42,8   |
| 2          | 0,064                             | 0,102  | 1,97                 | 4,38   | 13         | 0,104                             | 0,119  | 5,47                 | 20,84  |
| 3          | 0,091                             | 0,098  | 0,45                 | 0,6    | 14         | 0,095                             | 0,099  | 1,64                 | 3,02   |
| 4          | 0,089                             | 0,096  | 1,06                 | 2,2    | 15         | 0,065                             | 0,077  | 0,45                 | 0,59   |
| 5          | 0,089                             | 0,119  | 5,99                 | 26,04  | 16         | 0,064                             | 0,072  | 1,04                 | 1,64   |
| 6          | 0,013                             | 0,019  | 3,18                 | 3,93   | 17         | 0,143                             | 0,159  | 2,44                 | 2,82   |
| 7          | 0,065                             | 0,073  | 0,4                  | 0,41   | 18         | 0,032                             | 0,105  | 4,22                 | 8,17   |
| 8          | 0,058                             | 0,064  | 0,44                 | 0,49   | 19         | 0,131                             | 0,156  | 2,37                 | 3,1    |
| 9          | 0,072                             | 0,074  | 7,43                 | 21,24  | 20         | 0,147                             | 0,17   | 1,53                 | 5,08   |
| 10         | 0,051                             | 0,055  | 2,29                 | 4,87   | 21         | 0,141                             | 0,173  | 2,8                  | 5,07   |
| 11         | 0,057                             | 0,067  | 1,2                  | 3,61   | 22         | 0,197                             | 0,221  | 2,59                 | 4,87   |

Uma outra etapa da avaliação de campos eletromagnéticos residenciais consistiu na medição de campo magnético nas vizinhanças de eletrodomésticos. A Tabela 5.5 apresenta a identificação, a marca e o modelo de cada aparelho utilizado.

Tabela 5.5 – Identificação dos aparelhos eletrodomésticos.

| <b>Aparelho</b>       | <b>Marca</b>     | <b>Modelo</b>      |
|-----------------------|------------------|--------------------|
| Leitor DVD 1          | Sony             | DVP-NS325          |
| Leitor DVD 2          | Gradiente        | D-46n              |
| Leitor DVD 3          | LG               | DV5921N            |
| Leitor DVD 4          | Cougar           | CVD-550            |
| Videocassete 1        | Toshiba          | M-120              |
| Videocassete 2        | Semp             | X696               |
| Videocassete 3        | Panasonic        | NV-MV40            |
| Rádio-despertador 1   | NKS              | GL-323N            |
| Rádio-despertador 2   | Britania         | Sound BS63         |
| Secador de cabelo 1   | Lany             | Pro3000            |
| Secador de cabelo 2   | Black and Decker | SC831B             |
| Chapa de cabelo 1     | Conair           | CS19JCS            |
| Chapa de cabelo 2     | Taiff            | Cerâmica Easy      |
| Televisor 1 (20")     | Gradiente        | TV-2020            |
| Televisor 2 (20")     | Philco           | TP-2054            |
| Televisor 3 (14")     | CCE              | PS1407S            |
| Televisor 4 (14")     | LG               | Cinemaster         |
| Televisor 5 (29")     | Sony             | KV-29FS105         |
| Televisor 6 (29")     | Gradiente        | TF-2952            |
| Microsystem 1 (rádio) | Aiwa             | CA-DW700M          |
| Microsystem 2 (CD)    | Gradiente        | AS-200             |
| Microsystem 3         | CCE              | MCS-25             |
| Microsystem 4         | Lenox            | MC-245             |
| Microondas 1          | Consul           | CMS18OBHNA         |
| Microondas 2          | Panasonic        | NN-R94BHBR         |
| Refrigerador 1        | Brastemp         | BRJ44D10           |
| Refrigerador 2        | Dako             | DR320              |
| Computador            | HP               | Ultra VGA 1280     |
| Ventilador 1          | Britânia         | Fortis Ventus      |
| Ventilador 2          | Arno             | FD 40              |
| Ventilador 3          | Mondial          | V04                |
| Barbeador 1           | Philips          | Philishave HQ 444  |
| Barbeador 2           | Philips          | Philishave HQ 5824 |
| Liquidificador        | Walita           | RI1764             |
| Freezer 1             | Eletrólux        | FE26               |
| Freezer 2             | Consul           | CVU 26             |

As medições foram efetuadas em ambiente livre de interferências significativas. Cada equipamento foi posicionado em uma mesa de madeira de 1 m de altura (exceto as geladeiras e os freezers, colocados no solo). Utilizou-se o medidor de campo eletromagnético *Wandel & Goltermann*, modelo *EFA-300*.

Numa primeira etapa, mediu-se o nível da resultante do campo magnético em 60 Hz ao redor do dispositivo (direita, esquerda, frente, atrás e acima), e registrou-se o nível máximo gerado pelo aparelho.

Os valores máximos de campo magnético medidos nessa etapa são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Níveis máximos de campo magnético próximo a eletrodomésticos.

| <b>Aparelho</b>       | <b>Nível máximo de campo magnético (<math>\mu</math>T)</b> | <b>Local</b>                    |
|-----------------------|--|---------------------------------|
| Leitor DVD 1          | 0,23   | Acima                           |
| Leitor DVD 2          | 0,33   | Acima                           |
| Leitor DVD 3          | 0,017  | Acima                           |
| Leitor DVD 4          | 0,15   | Acima                           |
| Videocassete 1        | 11,5   | Acima                           |
| Videocassete 2        | 0,031  | Lateral esquerda                |
| Videocassete 3        | 0,053  | Acima                           |
| Rádio-despertador 1   | 3,92   | Frente                          |
| Rádio-despertador 2   | 17,73  | Acima                           |
| Secador de cabelo 1   | 3,4  | Parte traseira                  |
| Secador de cabelo 2   | 2,4  | Lateral direita                 |
| Chapa de cabelo 1     | 0,016  | Lateral esquerda                |
| Chapa de cabelo 2     | 3,88   | Parte traseira                  |
| Televisor 1           | 12,29  | Parte traseira                  |
| Televisor 2           | 3,7  | Lateral esquerda                |
| Televisor 3           | 3,6  | Acima                           |
| Televisor 4           | 5,8  | Acima                           |
| Televisor 5           | 2,76   | Lateral esquerda                |
| Televisor 6           | 0,59   | Parte traseira inferior central |
| Microsystem 1 (rádio) | 1,88   | Parte traseira                  |
| Microsystem 2 (CD)    | 15,8   | Parte traseira                  |
| Microsystem 3         | 0,293  | Parte traseira                  |
| Microsystem 4         | 1,4  | Parte traseira                  |
| Microondas 1          | 114  | Lateral direita                 |

## **5.6 Procedimentos para redução dos níveis de campos magnéticos de linhas de transmissão**

Existem alguns recursos que podem ser utilizados para reduzir os níveis de campos magnético nas faixas de passagens das linhas de transmissão que podem resumir-se a: limitar

as correntes que atravessam os condutores, reduzindo assim a carga transmitida; aumentar a largura das faixas de passagem ou ainda realizar a passagem subterrânea das linhas.

A alternativa de limitar as correntes das fases vai de encontro à crescente demanda por energia elétrica, representando assim um obstáculo à expansão do setor elétrico. Já o alargamento da faixa de passagem implica em um considerável impacto social e econômico, haja vista a necessidade de maiores desapropriações de imóveis. Quanto à opção de linhas subterrâneas, tem-se a elevação dos custos, que podem se tornar de cinco a oito vezes maior.

## **5.7 Procedimentos para redução dos níveis de campos elétricos de linhas de transmissão**

Podemos citar pelo menos dois recursos para a redução dos campos elétricos das linhas de transmissão é a diminuição da tensão de operação.

O recurso mais imediato é a diminuição da tensão elétrica de operação. O problema é que essa alternativa encontra obstáculo na regulação dos níveis de tensão do sistema, além de contrariar as tendências tecnológicas de aumento dos níveis de tensão para a redução de perdas elétricas.

Outra alternativa seria a elevação das distâncias dos condutores das linhas de transmissão em relação ao solo, todavia isso acarretaria custos adicionais para os empreendimentos já em operação.



## Capítulo 6

### LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Atualmente o setor elétrico brasileiro já dispõe de uma legislação específica sobre exposição humana a campos eletromagnéticos, que foi resultado de um longo processo que envolveu resistência da população à construção de novas instalações, críticas de organismos ambientais, disputas judiciais, além de discussões no âmbito do poder legislativo.

Para o desenvolvimento deste capítulo faz-se necessário inicialmente uma breve retrospecto dos principais acontecimentos de âmbito nacional, para que em seguida seja apresentada e analisada a legislação sobre o assunto.

#### **6.1 Disputas judiciais relacionadas a construção de linhas de transmissão**

Durante muitos anos o setor elétrico brasileiro ficou desprovido de uma legislação específica sobre limites de emissão de campos eletromagnéticos, o que ocasionou diversas demandas judiciais relacionadas ao embargo de obras linhas de transmissão de energia elétrica, bem como à própria operação.

Nesse sentido destacamos inicialmente uma Ação Civil Pública ajuizada pelo Ministério Público Federal no Estado do Ceará em 2001 contra a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Em outra ação judicial, o Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo obrigou a companhia Eletricidade de São Paulo S/A (ELETROPAULO) a aplicar o limite adotado pela legislação suíça para os campos eletromagnéticos na linha de transmissão Pirituba-Bandeirantes, instalada em 1931 na Região Oeste da capital paulista.

##### *6.1.1 Ação Civil Pública contra a Companhia Hidroelétrica do São Francisco.*

No ano de 2001 o Ministério Público Federal no Estado do Ceará ajuizou uma Ação Civil Pública contra a CHESF e a ANEEL, visando o embargo da construção de uma linha de transmissão de 230 kV, ou, em pedido alternativo, acaso autorizada a construção, que fosse mantida a distância mínima de 1 metro para cada 1.000 Volts entre as casas e a linha de alta voltagem.

Trata-se do processo nº 2001.81.00.009975-5 da Justiça Federal, Seção Judiciária do Ceará. Referida demanda foi julgada improcedente em primeira instância, permitindo assim a operação da referida linha de transmissão de acordo com o projeto da CHESF, que obedecia os limites recomendados pelo *ICNIRP*.

Neste processo a CHESF apresentou o Relatório Técnico ACET-473/99, elaborado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), que teve como objetivo a avaliação de medições de campos elétricos e magnéticos da linha de transmissão de 230 kV denominada *Fortaleza - Delmiro Gouveia* da CHESF de 03/06/99 a 01/07/99.

De acordo com o relatório, os valores máximos encontrados nas medições foram 1,85 kV/m (campo elétrico) e 41,25 mG (campo magnético), níveis significativamente abaixo das recomendações internacionais estabelecidas pela *ICNIRP*.

### *6.1.2 Ação judicial contra a Eletricidade de São Paulo S/A (ELETROPAULO)*

De acordo com a ação a *ELETROPAULO* pretendia aumentar o nível da tensão da linha de transmissão Pirituba-Bandeirantes de 88 para 138 kV.

A decisão do Tribunal de Justiça de São Paulo obrigou a *ELETROPAULO* a reduzir, em até seis meses, o campo magnético em toda a região mencionada a 1  $\mu$ T. (um micro Tesla), a uma altura de 1,5 m do solo. A decisão fixou ainda multa diária de R\$ 500 mil em caso de descumprimento.

Segundo a empresa as medições realizadas ao longo da linha de transmissão em questão atestaram que a radiação local é de 7,5  $\mu$ T. A legislação suíça determina como padrão de segurança a emissão de 1  $\mu$ T, todavia o parâmetro seguro de acordo com a *ICNIRP*, recomendado pela Organização Mundial de Saúde, e recentemente adotado pela legislação brasileira é de 83,3  $\mu$ T.

A decisão final está a cargo do Supremo Tribunal Federal, visto que a *ELETROPAULO* recorreu da decisão do Tribunal de Justiça de São Paulo. Trata-se do Recurso Extraordinário nº 627189.

## **6.2 Lei federal sobre limites de exposição humana a campos elétrico e magnético**

A Lei nº 11.934/2009, que dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, foi o resultado da sanção presidencial ao Projeto de Lei nº 2.576, de 2000, da Câmara dos Deputados.

O processo legislativo teve início na Câmara dos Deputados por meio do Projeto de Lei nº 2.576, de autoria do Deputado Fernando Gabeira, tendo como relator o Deputado Júlio Semeghini. O objetivo do projeto era estabelecer condições para instalação de fontes emissoras de radiação eletromagnética com campo de operação na faixa de 150 a 1000 megahertz (MHz). Posteriormente foi incluído o tratamento para todo o espectro de frequência no qual operam fontes de campos eletromagnéticos (entre 0 e 300 GHz).

Outra inclusão foi a adoção de programas de comunicação com o público, a disponibilização de informações sobre o atendimento dos limites de exposição, e o planejamento nacional e regional de estudos sobre campos eletromagnéticos, envolvendo o governo, os cidadãos e a indústria.

Os principais debates sobre o referido Projeto de Lei ocorreram na Comissão de Ciência e Tecnologia, Comunicação e Informática (CCTCI), à qual compete, nos termos do regimento interno da Câmara dos Deputados, a apreciação quanto ao mérito do assunto.

Destaca-se um trecho do Voto do Relator do Projeto de Lei, datado do ano de 2006, que diz o seguinte:

Até o presente momento, a ciência comprovou que a exposição a ondas eletromagnéticas de radiofrequência pode causar efeitos térmicos (aquecimento dos tecidos do corpo), provocando queimaduras ou choques, quando a exposição se dá em níveis muito elevados. Ainda não existe certeza científica quanto aos efeitos não térmicos de tais campos eletromagnéticos sobre o homem, ainda que diversas pesquisas estejam em curso nesse sentido.

Seguindo em seu Voto, o Relator faz uma explanação sobre as pesquisas científicas relativas ao assunto e ressalta as contribuições do ICNIRP, conforme transcrição a seguir:

Face a essa relativa incerteza científica sobre o tema, várias iniciativas de pesquisa foram organizadas em todo o mundo. A mais importante delas vem da International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), uma comissão científica independente criada especificamente para estudar o assunto, cuja finalidade é prover orientação e consultoria sobre danos à saúde provocados pela exposição aos campos eletromagnéticos. A Comissão publicou, em 1999, suas diretrizes a respeito da limitação de exposição à radiofrequência da população em geral e de pessoal diretamente exposto por razões profissionais.

Os limites de exposição à radiofrequência contidos nessas diretrizes contemplam ampla margem de segurança, pois o nível máximo admitido é 50 vezes inferior (0,08W/kg) ao menor nível a partir do qual se observaram efeitos térmicos sobre o corpo humano (4 W/kg). Embora não exista qualquer comprovação científica de que a exposição à radiofrequência na faixa de 0,08 a 4 W/kg ofereça danos à saúde humana, essa margem de segurança foi incorporada, por precaução, aos limites de exposição recomendados, até que seja definitivamente demonstrada a inexistência de risco.

Ao final o relator conclui pela aprovação do Projeto de Lei, cujo ponto principal era adoção dos limites de exposição eletromagnética estabelecidos pelo ICNIRP.

No dia 12 de março de 2008 o Projeto de Lei foi aprovado pela Câmara dos Deputados e em 31 de março de 2009 pelo Senado Federal.

Finalmente, no dia 5 de maio de 2009 o Projeto de Lei foi sancionado pelo Presidente da República, com veto parcial, transformando-se na Lei nº 11.934.

A principal disposição da referida lei está contida em seu art. 4º, a seguir transcrito:

Art. 4º Para garantir a proteção da saúde e do meio ambiente em todo o território brasileiro, serão adotados os limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para a exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos gerados por estações transmissoras de radiocomunicação e por sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica que operam na faixa até 300 GHz.

Parágrafo único. Enquanto não forem estabelecidas novas recomendações pela Organização Mundial de Saúde, nem definidos limites pelo Presidente da República, nos termos previstos no art. 7º desta Lei, serão adotados os limites da Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP) recomendados pela Organização Mundial de Saúde.

Importante destacar que referida lei inclui tanto as instalações do setor elétrico quanto de telecomunicações. Assim ficou a cargo do órgão regulador federal de serviços de energia elétrica, no caso a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, bem como do órgão regulador federal de telecomunicações, que é a Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL, a obrigatoriedade pela edição dos regulamentos específicos para as suas respectivas áreas de atuação, além de coordenar a fiscalização para o cumprimento dos limites estabelecidos.

### **6.3 Resolução Normativa nº 398/2010 da ANEEL**

Por determinação expressa contida no art. 15 da Lei nº 11.934, ficou a cargo do órgão regulador federal de serviços de energia elétrica editar regulamentação sobre os métodos de avaliação e os procedimentos necessários para verificação do nível de campo elétrico e magnético, além de outras providências.

Nesse sentido no dia 23 de março de 2010 foi aprovada e publicada no Diário Oficial da União a regulamentação da Lei nº 11.934 para o setor elétrico brasileiro. Trata-se da Resolução Normativa nº 398/2010 da ANEEL, cujos principais artigos serão doravante apresentados, juntamente com alguns comentários da Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição da ANEEL, por meio da Nota Técnica nº 0122/2009-SRD/ANEEL, quando da apresentação da proposta para a regulamentação da Lei.

O artigo 1º deixa claro que os limites e procedimentos estabelecidos na presente resolução referem-se à exposição do público em geral e da população ocupacional aos campos elétricos e magnéticos.

O artigo 2º traz os conceitos e definições a serem considerados nesta resolução. Merece destaque as definições de *Nível de Referência*, *Plano de Adequação*, *População em Geral*, *População Ocupacional*, *Relatório de Conformidade* e *Restrição Básica*, transcritas a seguir:

**Nível de Referência:** são os níveis de campo elétrico e magnético variáveis no tempo, para avaliação prática e expedita da exposição humana, estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante – ICNIRP e recomendados pela OMS a partir das Restrições Básicas, considerando fatores de segurança que asseguram o atendimento destas restrições.

**Plano de adequação:** corresponde ao documento a ser apresentado à ANEEL contendo no mínimo o cronograma físico-financeiro e os estudos técnicos que demonstrem a eficácia das medidas propostas para a adequação das instalações às Restrições Básicas.

**Público em Geral:** compreende indivíduos de todas as idades e diferentes estados de saúde não integrantes da População Ocupacional.

**População Ocupacional:** a população de adultos geralmente expostos a campos elétricos e magnéticos em condições conhecidas, em função da sua atividade ocupacional, e que são treinados para ser conscientes do risco potencial e tomar as precauções apropriadas.

**Relatório de Conformidade:** documento elaborado e assinado por entidade competente contendo a memória de cálculo ou os resultados das medições utilizadas, com os métodos empregados, para verificar o atendimento às Restrições Básicas para a exposição humana a campos elétricos e magnéticos.

**Restrição Básica:** são os limites máximos de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variantes no tempo, baseados em efeitos reconhecidos à saúde, estabelecidos pela ICNIRP e recomendados pela Organização Mundial de Saúde - OMS de modo a garantir que essas grandezas físicas não ultrapassem os limiares mínimos de interação biofísica com tecidos vivos, de modo a não causar danos à saúde.

No artigo 3º é apresentado um quadro referente aos níveis de campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo para frequência de 60 Hz, ou seja, os *Níveis de Referência*.

De acordo com a Nota Técnica nº 0122/2009-SRD/ANEEL, esses *Níveis de Referência* são os limites recomendados para exposição aos campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos para frequências até 300 GHz, conforme o *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, elaborado pela ICNIRP.

Tabela 6.1 - Níveis de Referência para campos elétrico e magnético variantes no tempo (60 Hz).

|                       | Campo Elétrico (kV/m) | Campo Magnético (μT) |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Público em Geral      | 4,17                  | 83,33                |
| População Ocupacional | 8,33                  | 416,67               |

O artigo 4º dispõe que os campos elétricos e magnéticos produzidos pelas instalações de geração, de transmissão, de distribuição e de interesse restrito, em qualquer nível de tensão, devem atender às *Restrições Básicas*. Já o parágrafo único ressalta que o atendimento aos *Níveis de Referência* garante o cumprimento das *Restrições Básicas*.

O artigo 5º traz uma ordem direcionada aos agentes de transmissão, no sentido de que estes devem, até o final da fase de comissionamento de novos empreendimentos, adicionar à documentação exigida pela ANEEL o memorial de cálculo ou o relatório das medições dos campos elétrico e magnéticos, contendo os dados relacionados no anexo da resolução, e seguir os procedimentos estabelecidos no artigo 6º, quando aplicáveis.

O parágrafo primeiro desse artigo 5º prevê que caso os valores calculados ou medidos sejam superiores aos *Níveis de Referência* estabelecidos no art. 3º, o agente pode apresentar à ANEEL o *Relatório de Conformidade*.

O parágrafo 2º do mesmo artigo 5º dispõe que, caso o agente opte por não realizar o *Relatório de Conformidade* ou o seu resultado demonstre o não-atendimento às *Restrições Básicas*, deve ser apresentado o *Plano de Adequação* das instalações. Outrossim, a ANEEL pode exigir o *Relatório de Conformidade* se o *Plano de Adequação* indicar a necessidade de investimentos, é o que dispõe o parágrafo 3º.

O artigo 6º trata dos procedimentos a serem seguidos pelos agentes de geração, transmissão e distribuição para suas instalações. Dispõe o artigo que esses agentes devem realizar os cálculos ou as medições dos campos elétricos e magnéticos referentes às suas instalações com tensão igual ou superior a 138 kV. Vale ressaltar que de acordo com o parágrafo 1º os cálculos devem ser baseados em metodologia consagrada e considerar as seguintes premissas: a) tensão nominal; b) temperatura máxima admissível de projeto; c) carregamento máximo do condutor para os regimes de operação e emergência; d) a distância mínima do condutor ao solo; e) configuração típica dos circuitos e sequência de fases associadas; e f) 1,5 m de altura do nível do solo para a população em geral.

O parágrafo 2º do artigo 6º estabelece que a medição deve seguir os seguintes procedimentos: I - No interior da subestação, para avaliar a exposição da população ocupacional, e no perímetro de cada subestação, de forma a verificar a exposição do público em geral a 1,5 m de altura do nível do solo, para as instalações de geração, transmissão e

distribuição com tensões iguais ou superiores a 138 kV; e II - No interior da faixa de servidão, para avaliar a exposição da população ocupacional, e no limite da faixa de servidão, de forma a verificar a exposição do público em geral a 1,5 m de altura do nível do solo, para as linhas de interesse restrito, de transmissão ou distribuição com tensões iguais ou superiores a 138 kV.

Outro requisito importante a ser seguido para as medições está no parágrafo 3º do artigo 6º, ou seja, devem ser executadas no período de carga pesada, conforme metodologia estabelecida na NBR 15415/2006, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, com equipamentos com certificado de calibração emitido entidade competente, nacional ou internacional ou, alternativamente, aferidos por laboratório especializado ou centro de pesquisa.

Quando os cálculos a que se refere o artigo 6º resultarem em valores iguais ou superiores aos *Níveis de Referência* estabelecidos no artigo 3º, devem ser realizadas medições dos campos elétricos e magnéticos. É o que dispõe o artigo 7º da Resolução.

De acordo com o parágrafo 1º do artigo 7º, caso os valores medidos sejam superiores aos Níveis de Referência, o agente deve: I - apresentar o *Relatório de Conformidade* à ANEEL em até 90 (noventa) dias contados a partir do vencimento dos prazos estabelecidos no art. 8º, caso os resultados demonstrem o atendimento às *Restrições Básicas*; ou II - apresentar o *Relatório de Conformidade* e o *Plano de Adequação* das instalações à ANEEL, em até 120 (cento e vinte) dias, contados a partir do vencimento dos prazos estabelecidos no art. 8º, caso os resultados demonstrem o não-atendimento às *Restrições Básicas*.

Caso o agente opte por não realizar o *Relatório de Conformidade*, o *Plano de Adequação* das instalações deve ser apresentado à ANEEL em até 60 (sessenta) dias. Além disso, a ANEEL pode exigir o *Relatório de Conformidade* se o *Plano de Adequação* indicar a necessidade de investimentos. É o que dispõe os parágrafos 2º e 3º do art. 7º.

De acordo com a Nota Técnica nº 0122/2009-SRD/ANEEL, o limite de 138 kV foi estabelecido com base nos artigos técnicos de diversos centros de pesquisa e nos estudos realizados pelas distribuidoras em projetos de pesquisa e desenvolvimento, os quais demonstram elevados níveis de segurança das instalações para tensões inferiores a 138 kV. As medições e cálculos apontam campos elétricos e magnéticos com intensidade muito abaixo dos limites recomendados pela OMS.

Inicialmente foi estabelecido pelo art. 8º da resolução que os agentes de geração, transmissão e distribuição deveriam enviar para a ANEEL, até o dia 23 de janeiro de 2011, o memorial de cálculo dos campos elétricos e magnéticos ou relatório de medições para suas instalações já existentes e com tensão superior a 138 kV.

Por meio da Resolução Normativa nº 413/2010, que alterou o artigo 8º da Resolução Normativa nº 398/2010 da ANEEL, foram estabelecidos novos prazos para envio dos memoriais ou relatório de medições: até o dia 30 de dezembro de 2010, para instalações com tensão superior a 500 kV; até o dia 30 de junho de 2011, para instalações com tensão superior a 230 kV e menor ou igual a 500 kV; até o dia 29 de dezembro de 2011, para instalações com tensão menor ou igual a 230 kV e maior ou igual a 138 kV.

Para o envio dessas informações, a ANEEL dispõe de uma ferramenta computacional denominada *Duto de Informações* (2011). Trata-se de um instrumento a ser utilizado como meio de transmissão para todos os arquivos a serem enviados para a ANEEL. Os arquivos serão transmitidos utilizando a *Internet*, através de um canal criptografado de maneira a garantir a confidencialidade dos dados. Apenas os usuários autorizados em cada parceiro da Agência poderão fazer a transmissão dos arquivos e monitorar o estado de processamento dos arquivos após sua chegada na ANEEL.

O parágrafo 3º do referido artigo 8º ressalta que os dados enviados pelos agentes serão divulgados no sítio da ANEEL na rede mundial de computadores. Ressalte-se que até a conclusão do presente artigo a ANEEL ainda não tinha feito qualquer divulgação nesse sentido.

Está muito claro que a obrigatoriedade de encaminhar à ANEEL o memorial de cálculo dos campos elétricos e magnéticos ou relatório das medições a que se refere o artigo 8º é somente para os agentes proprietários de instalações com tensão igual ou superior a 138 kV. Quando as instalações tiverem tensão inferior a 138 kV basta que os agentes encaminhem à ANEEL, até o dia 29 de dezembro de 2011, uma correspondência assegurando que tais instalações não emitem campos elétricos e magnéticos superiores aos Níveis de Referência. É o que dispõe o artigo 8-A.

Outro aspecto que merece ser destacado na Resolução é o disposto do art. 9º, segundo o qual qualquer titular de unidade consumidora pode requisitar à distribuidora, mediante solicitação formal, a medição dos campos elétricos e magnéticos gerados por instalações de tensão igual ou superior a 2,3 kV. Trata-se de um direito do consumidor de energia elétrica.



Portanto, outra pessoa que não seja titular de unidade consumidora não poderá exercer esse direito junto à distribuidora.

O parágrafo 1º do art. 9º dispõe que a medição deverá seguir os procedimentos estabelecidos no art. 6º e ser realizada em até 30 (trinta) dias após o recebimento da solicitação pelo proprietário da instalação. Ressalte-se o disposto dos parágrafos 2º e 3º, segundo os quais o proprietário da instalação deve informar previamente ao consumidor todos os custos e prazos para realização das medições. Todavia, caso os valores medidos sejam inferiores aos *Níveis de Referência* estabelecidos no art.3º, o consumidor deve arcar com os custos decorrentes desse procedimento.

Após a realização das medições feitas a pedido dos interessados, os resultados obtidos devem ser encaminhados ao consumidor, com cópia para a ANEEL, juntamente com os Níveis de Referência e a conclusão. É o que dispõe o parágrafo 5º do artigo 9º.

Por fim, o artigo 10 deixa claro que o descumprimento dos procedimentos estabelecidos nesta Resolução poderá implicar a imposição das penalidades previstas em regulamento específico da ANEEL.

## **6.4 Legislação ambiental**

O Poder Público tem buscado efetivar a proteção do meio ambiente por meio de várias disposições constitucionais e legais, inclusive sob a forma de regulamentos administrativos e leis penais. A Constituição Federal destaca a obrigatoriedade do Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EPIA), também chamado de Estudo de Impacto Ambiental (EIA), cuja previsão também encontra-se na Resolução nº 001/86 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).

Nesse sentido, o Direito Penal também tem contribuído de forma positiva, procurando tipificar como crime ambiental condutas que causem impactos ao meio ambiente, resultando em danos à saúde humana.

### **6.4.1 O meio ambiente na Constituição Federal**

A Constituição Federal de 1988 deixou claro que o meio ambiente é um bem de uso comum do povo, conforme dispõe o art. 225, segundo o qual “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida [...]”.

Para discorrer sobre esse assunto destacamos os comentários de Celso Fiorillo (2006, p. 193) sobre o meio ambiente na Constituição Federal de 1988:

A Constituição Federal de 1988, ao estabelecer de forma pioneira na história do direito constitucional em nosso país a existência de um bem que tem duas características específicas: ser de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, conforme estabelece o art. 225, formulou inovação verdadeiramente revolucionária, criando um terceiro gênero de bem que não se confunde com os públicos e muito menos os privados.

Restou claro que o meio ambiente não é uma coisa pertencente exclusivamente à União, ao Estado ou ao Município ou a algumas dessas pessoas jurídicas, mas um bem de uso comum do povo, devendo ser protegido por todos.

#### 6.4.2 O ar atmosférico como parte do meio ambiente

Depreende-se do disposto no art. 225 da Constituição Federal que o meio ambiente é constituído de todos aqueles bens de uso comum do povo essenciais à sadia qualidade de vida; dentre eles, destacamos a atmosfera, a camada de ar que envolve o planeta terra.

Além de estar sujeito à poluição por gases tóxicos, como o monóxido de carbono emitido pela descarga dos automóveis movidos a combustíveis fósseis, não é forçoso compreender que o ar atmosférico também é constantemente ocupado por ondas eletromagnéticas de diversos tipos e das mais variadas fontes, inclusive das linhas de transmissão de energia elétrica.

Não há dúvidas de que a atmosfera é um potencial veículo transmissor de males à população humana, bem como aos animais e vegetais. Daí a especial atenção que merece ser dada a esse bem, não só pelo poder público, mas por toda a sociedade, visando à sadia qualidade de vida de todos.

#### 6.4.3 Ar atmosférico e poluição eletromagnética.

Édis Milaré faz importantes comentários sobre o ar atmosférico, citando inclusive posicionamento do civilista Caio Mario da Silva Pereira (1984 apud MILARÉ, 2005. p. 274) sobre a indisponibilidade natural desse bem:

O ar atmosférico, considerado na qualidade de massa gasosa, por não ser suscetível de apropriação, é naturalmente indisponível. Daí dizem os civilistas tratar-se de coisa *naturalier extra commercium*. A legislação, sob essa ótica, cuidava desse bem tão necessário à preocupação da legislação ambiental, ainda assim um pouco tímida nesse campo.

Com efeito, o ar é uma coisa natural e está fora do comércio, é inegociável pela sua

própria natureza.

Importante destacar o que dispõe a Enciclopédia Mirador Internacional (1975, p. 9101) sobre a poluição do ar:

Há poluição do ar quando a presença de uma substância estranha ou uma variação importante de seus componentes é suscetível de provocar efeito perturbador – considerando os conhecimentos científicos do momento – ou, de criar um incômodo, segundo a definição do Conselho da Europa em 1967. A ressalva de conhecimentos científicos significa que a concentração de determinado poluente, hoje aceitável, poderá deixar de o ser no futuro, caso pesquisas científicas ou epidemiológicas venham a demonstrar o contrário.

Concluimos, portanto, que determinados tipos e intensidades de radiações introduzidas no meio ambiente por fatores artificiais, ou mesmo naturais, hoje de efeitos desconhecidos, porém aceitáveis, poderão ser consideradas maléficas no futuro, com o avanço das pesquisas científicas. Nesse sentido podemos dizer que a poluição eletromagnética é um tipo de poluição do ar atmosférico.

#### 6.4.4 *Crime ambiental*

A Lei nº 9.605/98, que trata dos crimes ambientais, tipifica em seu artigo 54 a conduta de “causar poluição de qualquer natureza em níveis que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortalidade de animais ou a destruição significativa da flora”, estabelecendo pena de detenção de seis meses a quatro anos e multa, sendo a detenção reduzida de seis meses a um ano se o crime for culposo.

Nesse sentido faz-se necessário conhecer a definição legal de poluição, que se encontra no inciso III do art. 3º da Lei nº 6.938/81. Antes porém é importante destacar outros dois conceitos que figuram nos incisos I e II do mesmo art. 3º da citada lei. Trata-se dos conceitos de “meio ambiente” e “degradação da qualidade ambiental”:

I – **meio ambiente**, o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas;

II – **degradação da qualidade ambiental**, a alteração adversa das características do **meio ambiente** (Grifos nossos)

Com esses dois conceitos podemos então entender o conceito legal de poluição:

III - **poluição**, a **degradação da qualidade ambiental** resultante de atividades que direta ou indiretamente:

- a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- c) afetem desfavoravelmente a biota;
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- e) **lançam matéria ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.** (Grifos nossos)

Pode-se observar que considera-se poluição o lançamento de campos eletromagnéticos por linhas de transmissão, em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos. Esses padrões ambientais estão estabelecidos agora na Resolução Normativa nº 398/2010 da ANEEL.

Com isso fica claro que a emissão de campos elétrico e magnético por linhas de transmissão acima dos limites estabelecidos na Resolução da ANEEL é considerada poluição, o que configura a hipótese do crime de poluição prevista no art. 54 da Lei nº 9.605/98.

O simples fato de ainda pairarem dúvidas sobre os possíveis efeitos adversos dos campos eletromagnéticos para a saúde humana já é motivo para preocupações, causando assim um certo desconforto no homem, interferindo na sua qualidade de vida.

Na ocorrência de crime ambiental surge a responsabilidade penal para quem praticou o fato, o que não exime o responsável da obrigação de reparar os danos causados, tanto perante a administração pública quanto na seara civil.

Ressaltamos que a Constituição Federal de 1988 deixou claro no parágrafo 3º do artigo 225 que não só as pessoas físicas poderão ser responsabilizadas por condutas ou atividades lesivas ao meio ambiente, mas também as pessoas jurídicas.

## Capítulo 7

# MEDIÇÕES E CÁLCULOS DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

As empresas do Grupo Eletrobrás dispõem de um programa computacional para cálculo de campos elétrico e magnético e de indução de correntes e tensões em objetos na vizinhança de uma linha de transmissão de energia elétrica. Trata-se do CAMPEM, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

No Relatório Técnico DIE – 36788/07 (2007) do CEPEL são apresentadas as principais características do programa CAMPEM, inclusive a simulação de um caso teste para facilitar o desenvolvimento de aplicações pelos usuários do programa.

Neste capítulo também são apresentados os resultados dos cálculos dos campos elétricos e magnéticos uma linha de 500 kV com a utilização do programa CAMPEM, objeto da monografia de Rafael Monteiro da Cruz Silva, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que tem como título *Estudo da exposição humana a campos elétricos e magnéticos da frequência industrial utilizando métodos numéricos* (2009).

Ao final são apresentados os resultados de medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV da CEMIG, objeto da dissertação de mestrado de Gernan Edson Guimarães, da Universidade Federal de Minas Gerais, com o título de *Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV* (2005).

Ao final serão mostrados os resultados de medições e cálculos de campos elétricos de um dos circuitos da linha de transmissão de 750 kV de FURNAS.

## 7.1 Programa CAMPEM

Trata-se de uma ferramenta importantíssima para tomada de decisões sobre as características de uma linha de transmissão, principalmente sobre a largura da faixa de passagem e a altura mínima dos cabos ao solo, tendo em vista os *níveis de referência* para campos elétricos e magnéticos.

Outra aplicação do CAMPEM está relacionada à indução de correntes e tensões. Com a passagem de uma linha de transmissão perto de áreas habitadas surge o problema da indução, em objetos metálicos, de correntes e tensões devido aos campos elétricos e magnéticos. Estes objetos, quando expostos ao público, podem ser fontes do choque elétrico por contato.

O Programa CAMPEM foi desenvolvido utilizando-se a linguagem FORTRAN para o módulo de cálculo e C<sup>++</sup> para o módulo de entrada e saída de dados.

### 7.1.1 Metodologia dos cálculos

As metodologias para os cálculos dos campos elétrico e magnético utilizados para a implementação do CAMPEM foi a mesma apresentada no Capítulo 3 deste trabalho.

### 7.1.2 Interface gráfica do CAMPEM

A interface permite ações de manipulação, edição, execução dos casos e ainda um módulo de ajuda para o desenvolvimento do trabalho, como mostrado nas Figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4.

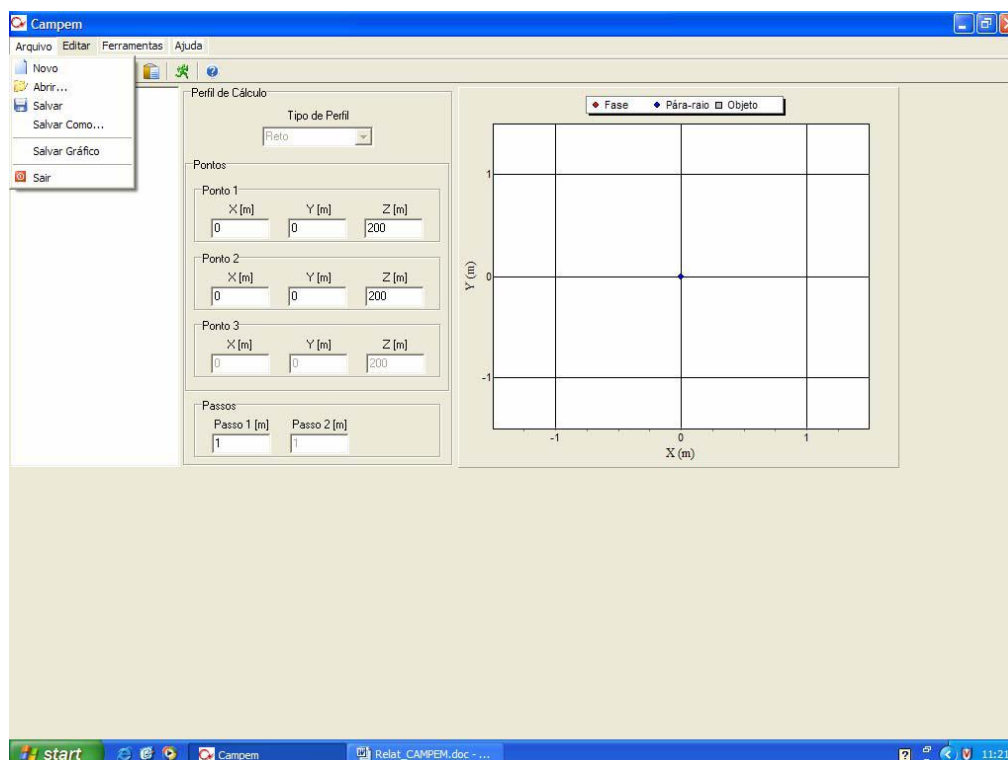


Figura 7.1 - Função *Arquivo* (manipulação de arquivos).

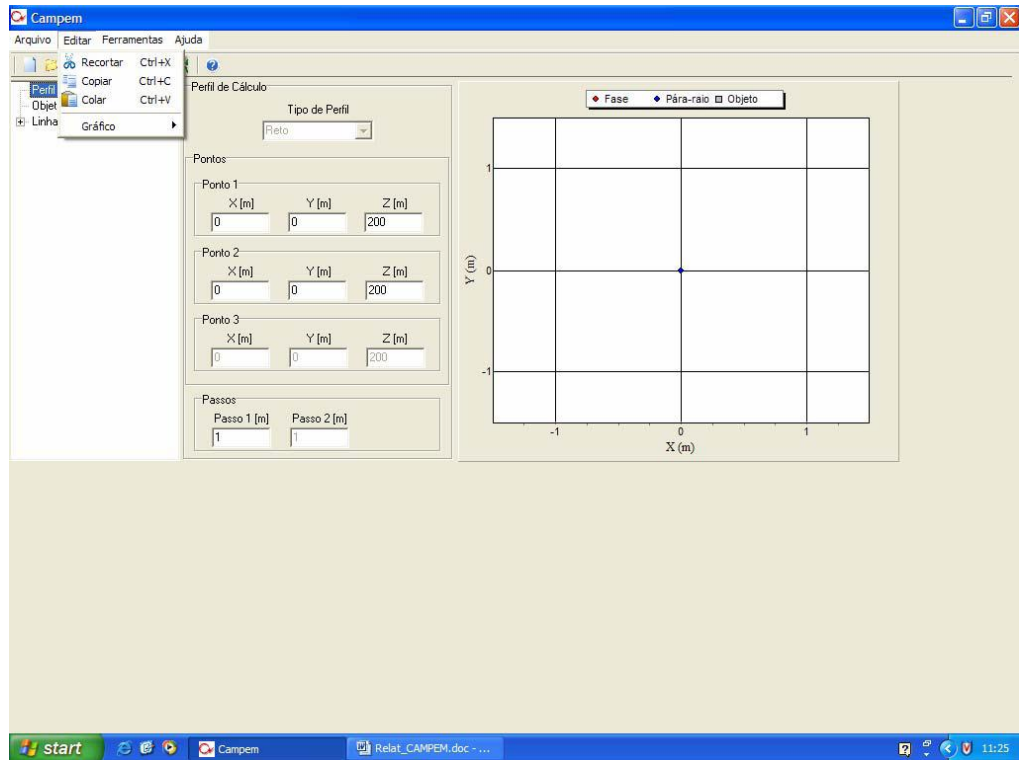


Figura 7.2 - Função *Editar* (edição de dados).

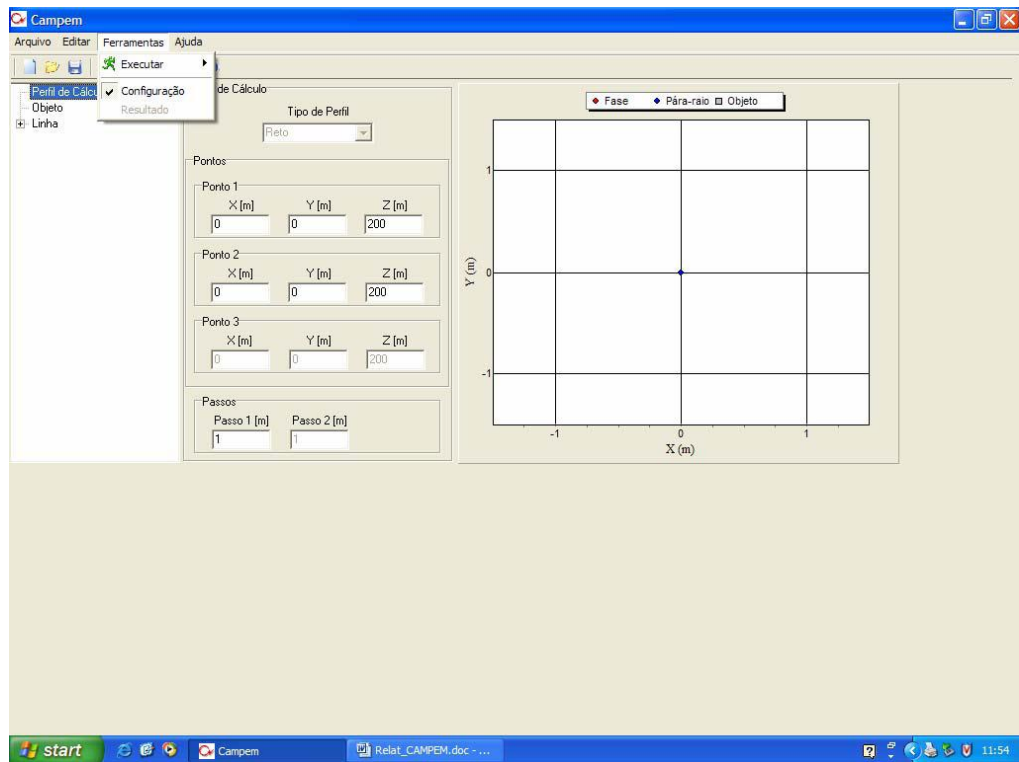


Figura 7.3 - Função *Ferramentas* (execução do caso).

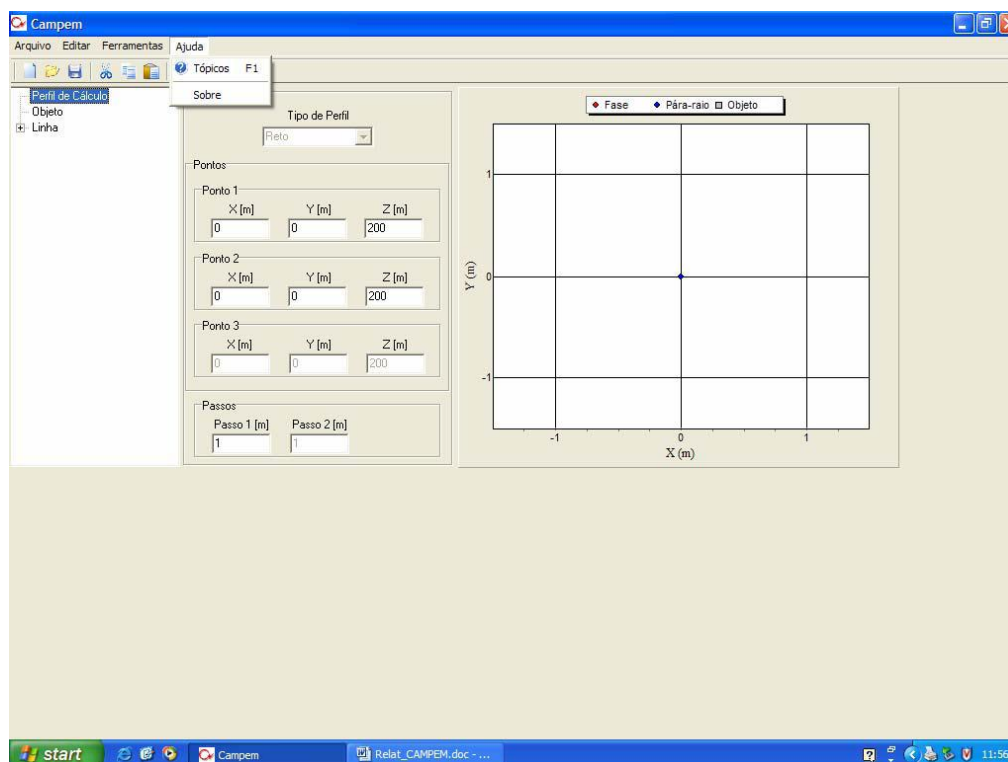


Figura 7.4 - Função *Ajuda* (“help” do programa).

### 7.1.3 Entrada de dados

Consta do Relatório Técnico DIE -36788/07 (2007) que para a simulação do caso teste foram utilizados dados de uma linha de transmissão de 345 kV de FURNAS, Corumbá-Brasília Sul, cujas características são apresentadas a seguir na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Características da linha de transmissão de 345 kV de FURNAS.

|                                    |                                   |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| Tensão de fase:                    | 345 kV                            |
| Corrente nas fases:                | 106 A                             |
| Comprimento do vão:                | 365 m                             |
| Sequência das fases:               | C, B e A (perfil reto horizontal) |
| Alturas das fases (A, B e C):      | 22,5 m, 22,17 m e 21,5 m          |
| Alturas dos pára-raios (PR1 e PR2) | 27,71 m e 29,04 m                 |
| Distância entre fases:             | 7,0 m                             |
| Largura da faixa de servidão:      | 40 m                              |
| Condutor:                          | Rail                              |
| Cabo pára-raios:                   | EHS 3/8”.                         |



A Figura 7.5 mostra a interface “Perfil de Cálculo” referente à entrada dos dados para os cálculos dos campos elétricos e magnéticos a um perfil de um metro do solo, no meio do vão e na extensão de toda a faixa de passagem de 40 m (20 m para cada lado).

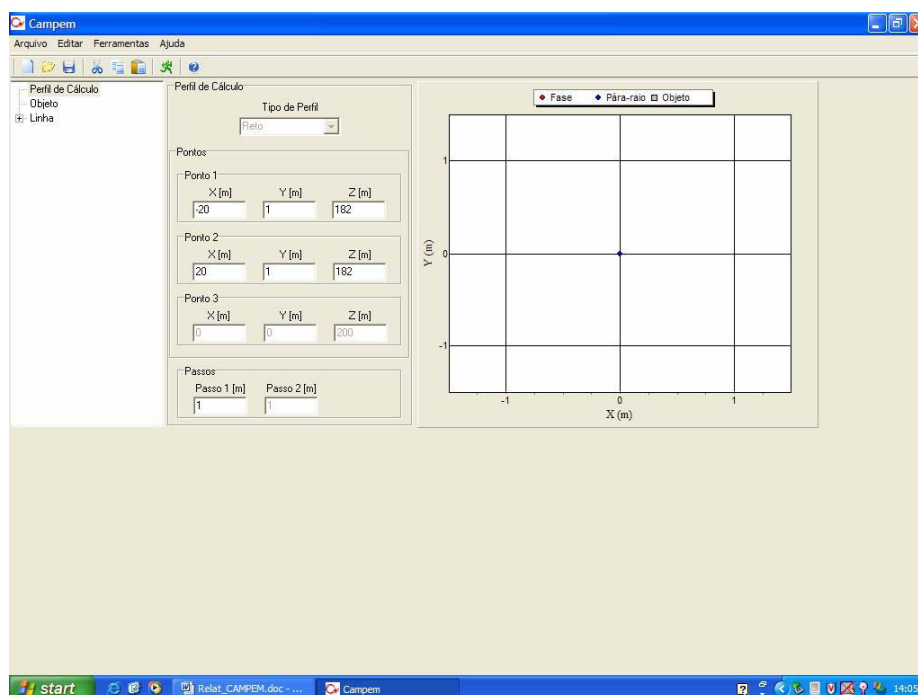


Figura 7.5 – Definição do perfil de cálculo.

A Figura 7.6 mostra a interface “Objeto” para a definição de um objeto esférico de 0,1 m de raio, localizado a um metro do solo, no meio do vão.

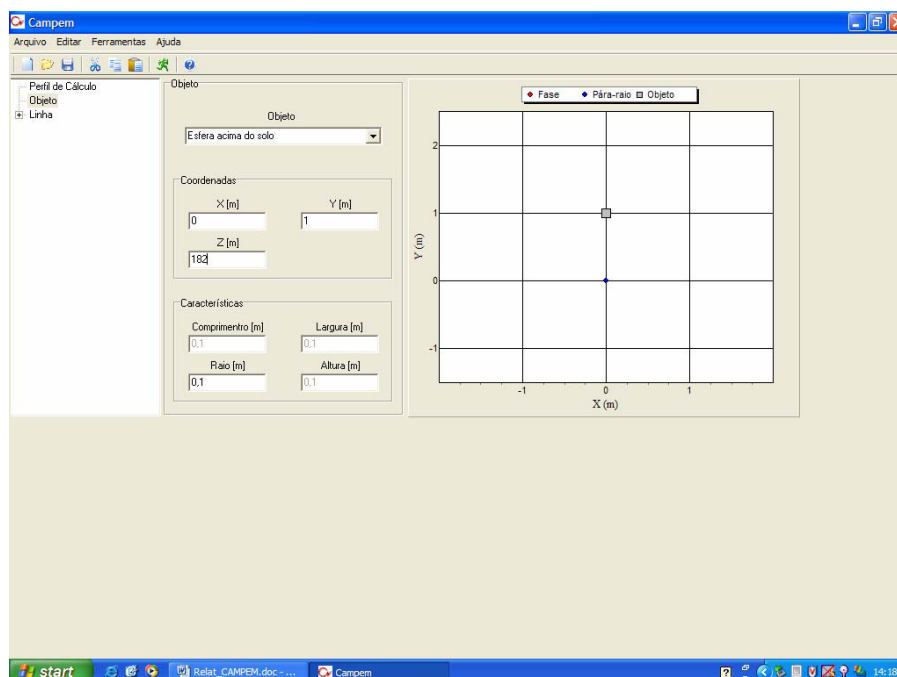


Figura 7.6 – Interface *Objeto* - Definição de objeto esférico localizado acima do solo.

A Figura 7.7 mostra a interface “Linha” para a entrada das características da linha.

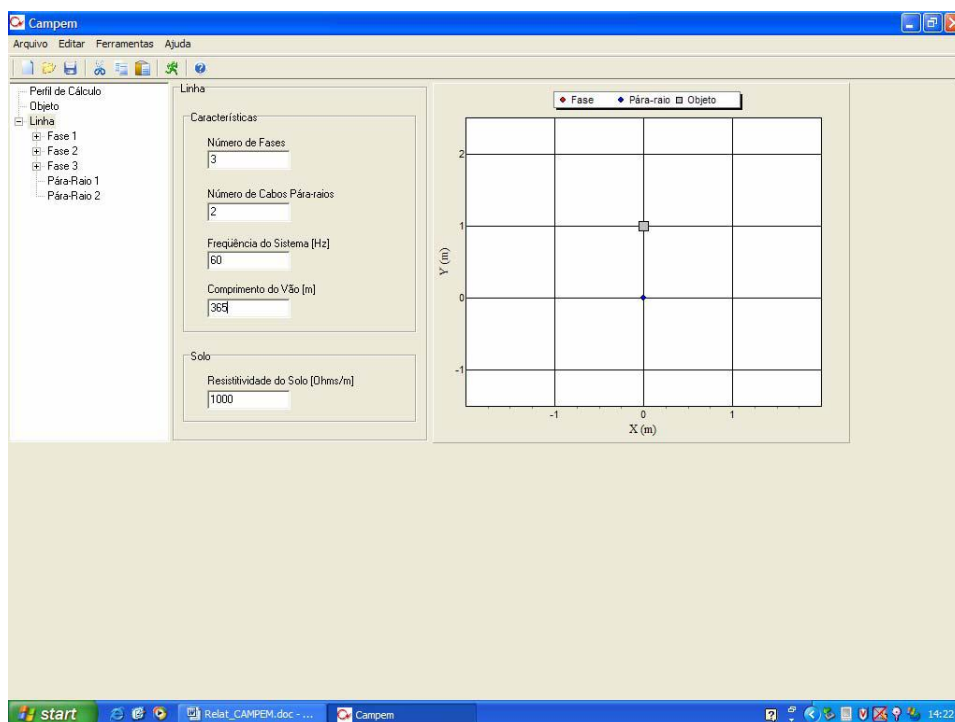


Figura 7.7 – Definição das características da linha de transmissão.

As Figuras 7.8 e 7.9 mostram as interfaces para a entrada de dados das fase e do pára-raios.

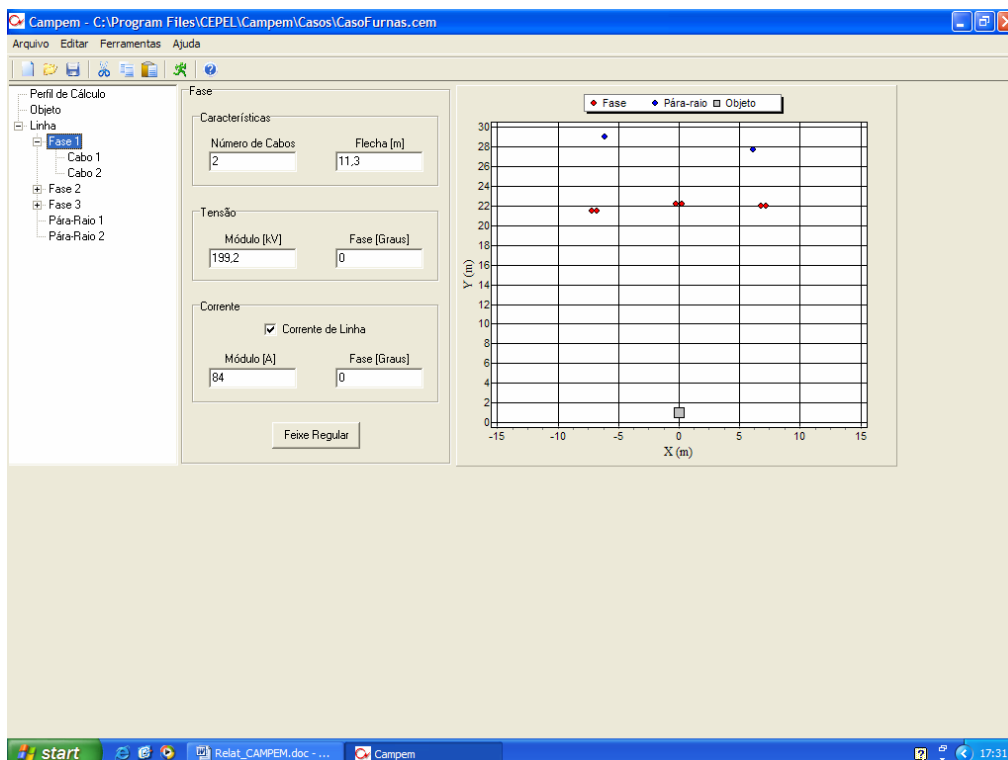


Figura 7.8 – Entrada dos dados das fases e pára-raios.

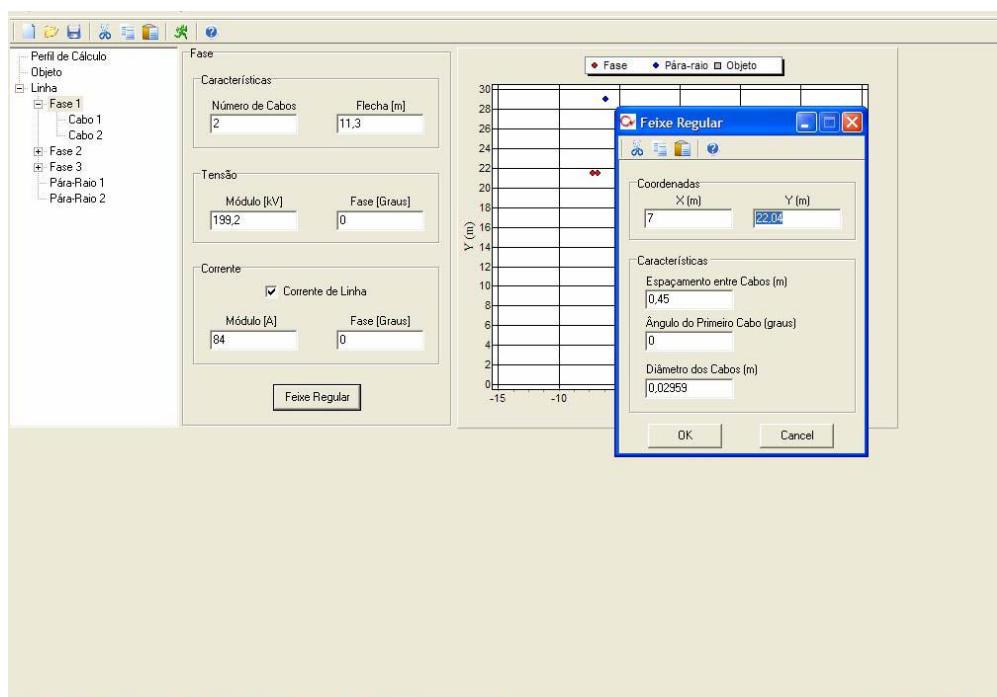


Figura 7.9 – Entrada dos dados das fases (“Feixe Regular”).

Na figura 7.10 é apresentada interface para a execução dos cálculos dos campos elétrico, campo magnético e induções.

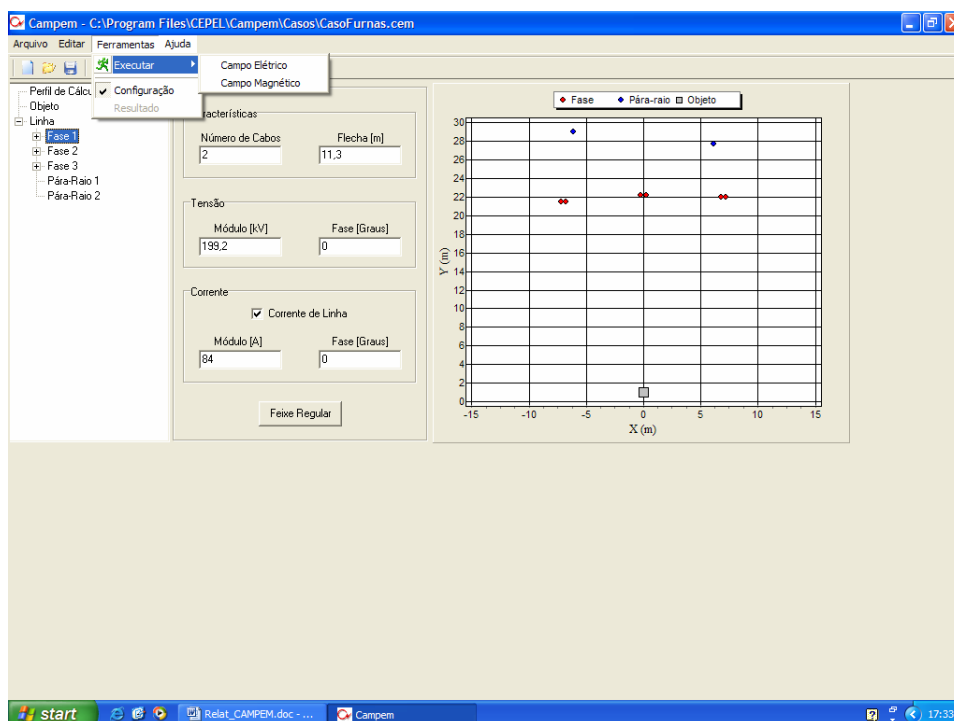


Figura 7.10 – Interface de execução dos módulos de cálculo dos campos.

As Figuras 7.11 e 7.12 mostram os gráficos dos campos elétrico e magnético.

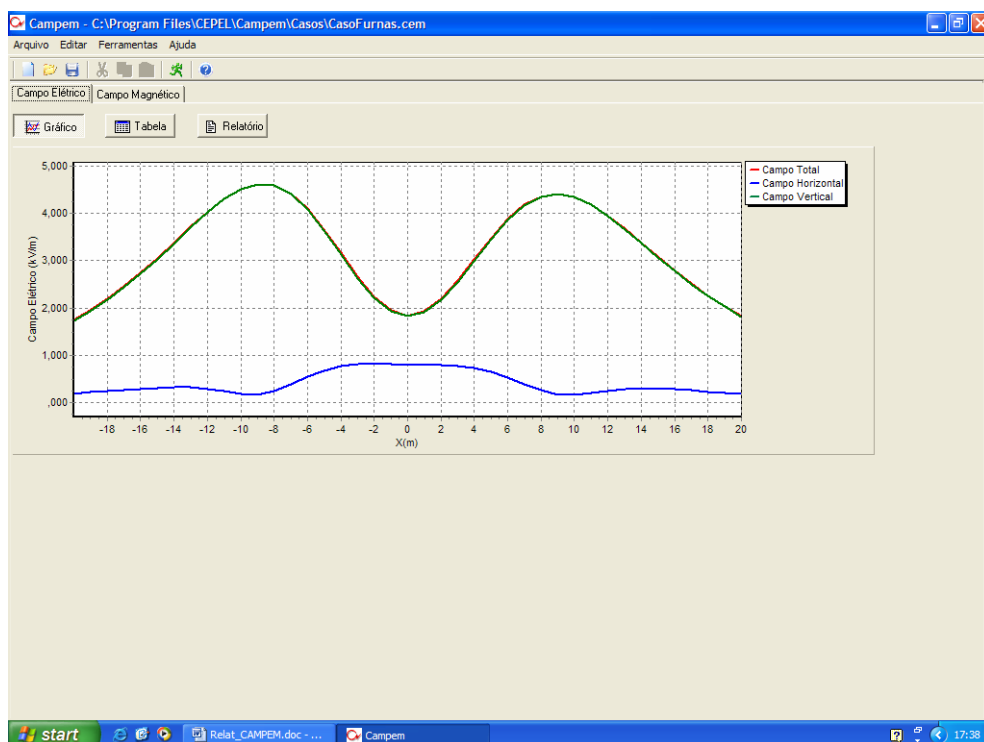


Figura 7.11 – Resultado gráfico do campo elétrico.

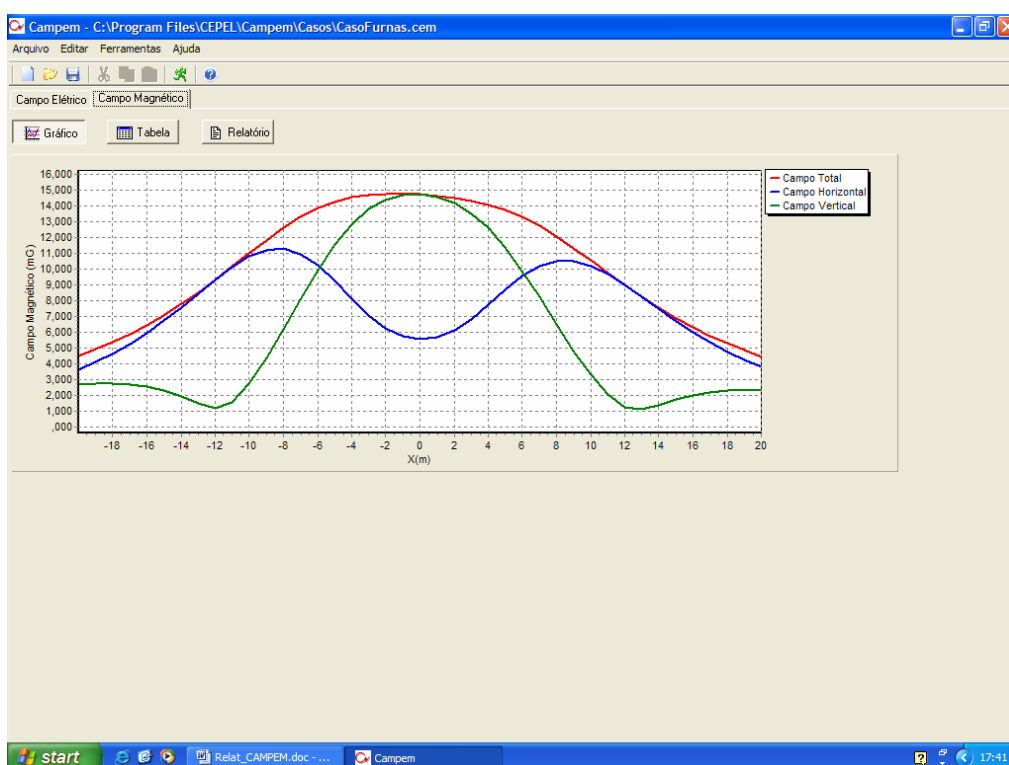


Figura 7.12 – Resultado gráfico do campo magnético

As Figuras 7.13 e 7.14 mostram os valores dos campos elétrico e magnético, respectivamente, por coordenada.

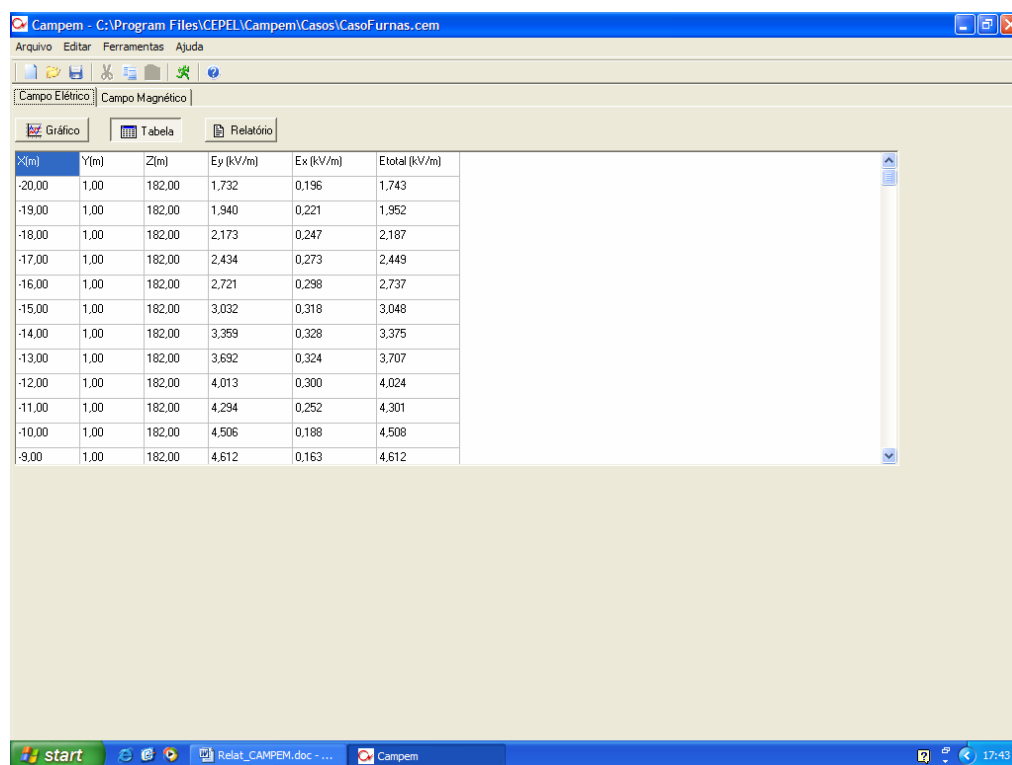


Figura 7.13 – Valores de campo elétrico por coordenada.

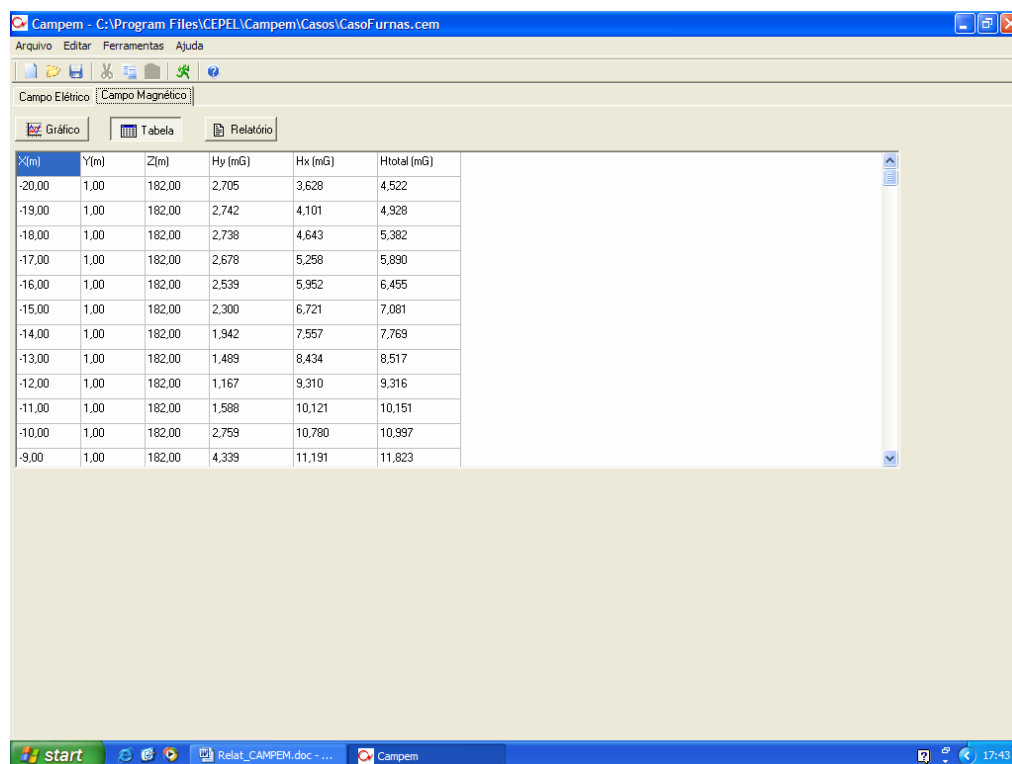


Figura 7.14 – Valores de campo magnético por coordenada.

Por fim, são apresentados na Figuras 7.15 a 7.17 os relatórios contendo os dados para os campos elétrico, magnético e indução, respectivamente.

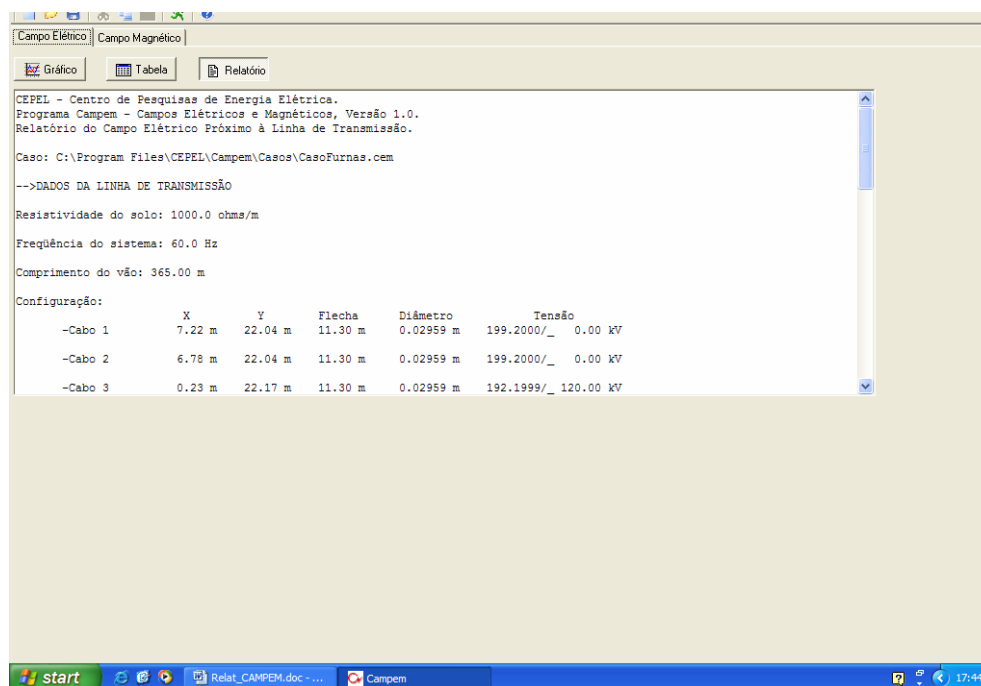


Figura 7.15 – Relatório de dados do campo magnético

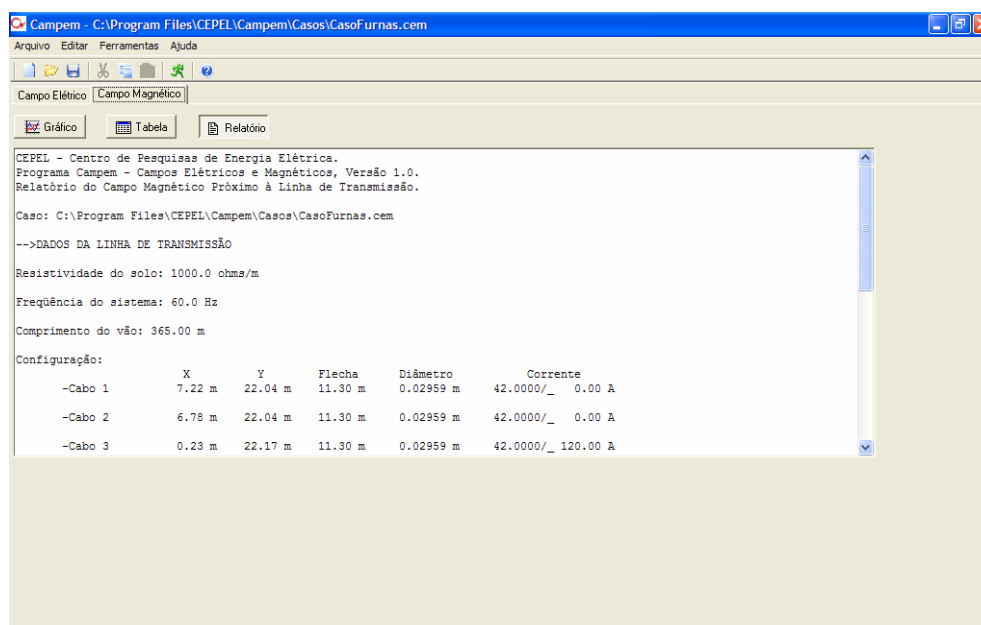


Figura 7.16 – Relatório de dados do campo magnético

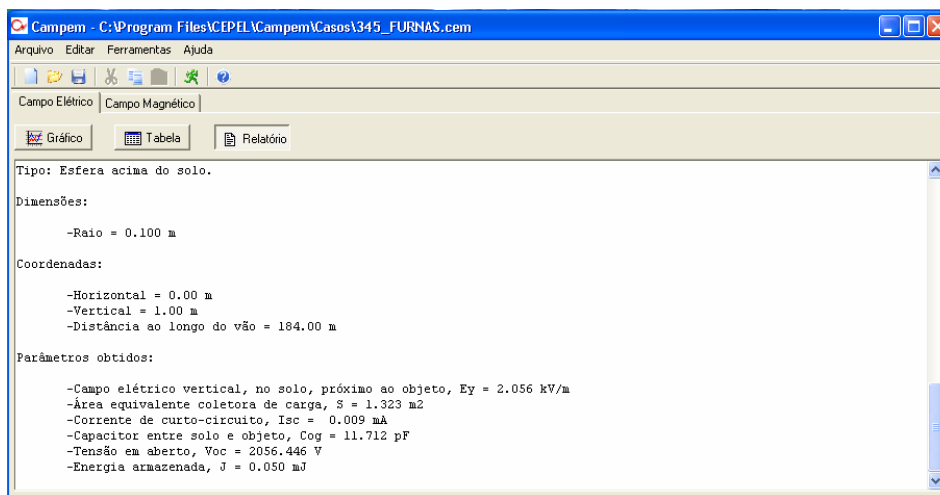


Figura 7.17 – Relatório de dados da indução elétrica na esfera.

#### 7.1.4 Análise dos resultados

Os resultados apresentados mostram que os valores máximos de campos elétrico e magnéticos foram 4,612 kV/m e 11,823  $\mu$ T, respectivamente, calculados dentro da faixa de servidão. Observa-se que nenhum dos valores calculados de campos elétricos e magnéticos ultrapassa os *níveis de referência* recomendados pela *ICNIRP*. Portanto obedece a legislação brasileira.

Observa-se todavia que para este caso não foram realizadas medições de campo.

## 7.2 Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV

Nesta seção será feita uma explanação sobre as medições e os cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV da CEMIG, objeto da dissertação de mestrado de Gernan Edson Guimarães, da Universidade Federal de Minas Gerais, com o título de *Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV* (2005).

A metodologia de cálculos utilizada é aquela descrita no Capítulo 3 deste trabalho.

### 7.2.1 Características da linha de transmissão

Foi selecionado um vão real de uma linha de transmissão da CEMIG, localizada no município de Vespasiano. Trata-se de um linha denominada LT Neves 1 – Vespasiano 2, e o vão estudado situava-se entre as estruturas 51 e 52. As características dessa linha são apresentadas da Tabela 7.2:

Tabela 7.2 - Características da linha de transmissão de 500 kV da CEMIG

|                                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| Tensão média de operação:      | 545 kV          |
| Corrente média de operação:    | 650 A           |
| Comprimento do vão:            | 285 m           |
| Configuração:                  | Horizontal.     |
| Altura mínima cabo-solo:       | 10,86 m         |
| Altura máxima cabo-solo:       | 25,26 m         |
| Número de circuitos:           | 1               |
| Número de fases:               | 3               |
| Distância entre fases:         | 12 m            |
| Número de condutores por fase: | 3               |
| Espaçamento entre condutores:  | 0,457 m         |
| Largura da faixa de servidão:  | 70 m            |
| Condutor:                      | Ruddy (900 MCM) |
| Diâmetro do condutor:          | 0,02874 m       |

### 7.2.2 Cálculo dos campos elétrico e magnético.

Para as simulações dos campos elétricos e da densidade de fluxo magnético, os procedimentos de cálculo apresentados no Capítulo 3, itens 3.1 e 3.2, foram implementados em um programa computacional utilizando o Matlab ®, porém o código fonte não foi apresentado na dissertação do autor. Os cálculos foram feitos para pontos a 1 metro do solo.

### 7.2.3 *Medições dos campos elétrico e magnético.*

Os procedimentos utilizados para as medições dos campos elétrico e magnético seguiram as recomendações da norma IEC 61786:1998, que fornece um guia para medição dos valores eficazes de regime permanente de campos elétricos e magnéticos na faixa de frequência de 15 Hz a 9 kHz, definindo as bases para a elaboração de um protocolo de medição de acordo com os objetivos específicos e as recomendações da norma IEEE Std 644-1994, referenciada pela primeira como procedimentos específicos para linhas aéreas de transmissão.

As medições foram realizadas a 1 metro do solo, conforme recomenda a norma IEEE Std 644-1994. Outra recomendação é que o operador deve ficar no mínimo a 2,5 metros de distância do ponto de medição, uma vez que a presença humana altera os valores de campo.



O equipamento de medição utilizado foi o *Narda Safety Test Solution, EFA-200-300*. Trata-se um sistema analisador de campo eletromagnético, composto por uma unidade básica para configuração e armazenamento dos dados e sensores de campo elétrico e magnético. Para a medição do campo magnético foi utilizado um sensor com 3 bobinas dispostas ortogonalmente. Já para a medição do campo elétrico foi utilizado um sensor formado por um cubo, constituído por três pares de placas paralelas, também arrançadas ortogonalmente, permitindo assim a medição do campo nas três direções do espaço.

O instrumento também dispõe de filtros seletivos, o que possibilita a medição dos campos numa faixa de frequência de 60 Hz. O modo de detecção escolhido foi o r.m.s, onde a média quadrática é calculada a partir das médias quadráticas para os três eixos de medidas.

De acordo com o manual de operação do equipamento utilizado, para as configurações escolhidas nas medições, o erro típico para a densidade de fluxo magnético é menor que  $3\% \pm 1 \text{ nT}$  e para o campo elétrico é menor que  $5\% \pm 1 \text{ V/m}$ , incluindo todos os erros parciais (absoluto, resposta em frequência, isotropia e desvio de temperatura).

As medições foram realizadas no horário de maior carga e no período de menor variação da corrente, ou seja, de 09:00 às 16:00 hs.

As medições dos campos elétricos e magnéticos foram feitas em 62 seções transversais, cada uma com 17 pontos de medição, totalizando 4.402 pontos de medição.

A Figura 7.18 mostra esquematicamente a área do vão avaliado, bem como os obstáculos existentes. As dimensões dessa área são seguintes: 285 metros de comprimento (referente ao comprimento do vão) e 70 metros de largura, sendo 35 metros para um lado do eixo central da linha de transmissão e outros 35 metros para o outro. Dessa forma foram definidas 62 seções transversais ao longo do eixo central da linha de transmissão identificadas de Seção 0 até Seção 61, sendo que para cada uma dessas seções foram definidos 17 pontos (um a cada cinco metros, identificados pelos números inteiros -35, -30, -25, -20, -15, -10, -5, 0, +5, +10, +15, +20, +25, +30 e + 35, sobre uma linha imaginária que atravessa a faixa de passagem de forma transversal ao eixo central da linha de transmissão).

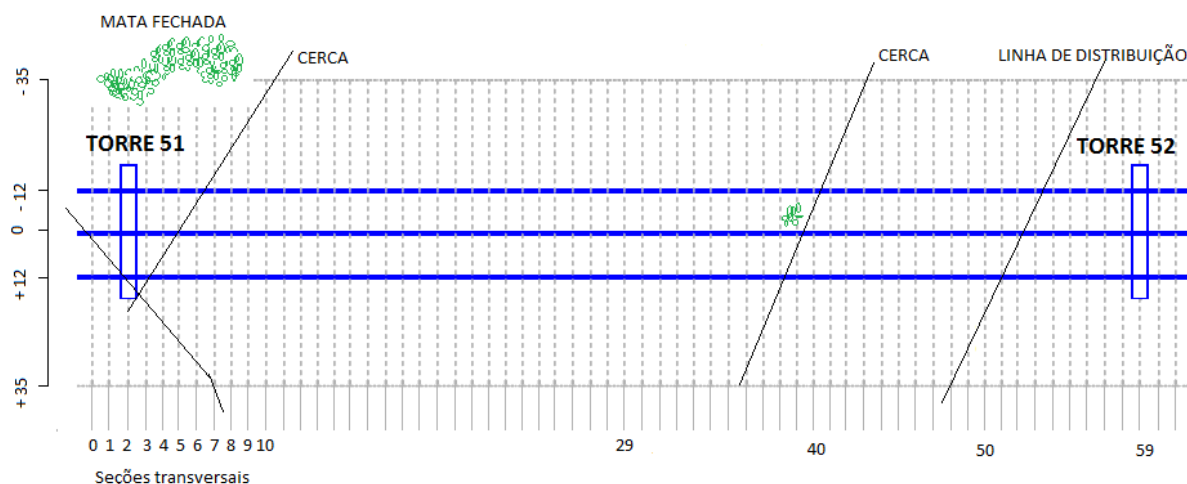


Figura 7.18 – Ambiente do vão da linha de 500 kV da CEMIG.

Para o presente trabalho só nos interessa a situação mais extrema, ou seja, onde as distâncias entre os cabos e o solo são mínimas, e, portanto, onde as intensidades dos campos elétrico e magnético serão máximas.

As Figuras 7.19, 7.20, 7.21 e 7.22 apresentam os gráficos dos perfis transversais de campo elétrico e da densidade de fluxo magnético das Seções 28 e 29, localizadas próximas ao meio do vão. A Seção 29 é a de menor altura cabo-solo do vão e onde foram medidos os maiores valores de campo elétrico e da densidade de fluxo magnético em todo o vão, sendo os valores de  $13,30 \mu\text{T}$  para a densidade de fluxo magnético e  $10,48 \text{ kV/m}$  para o campo elétrico.

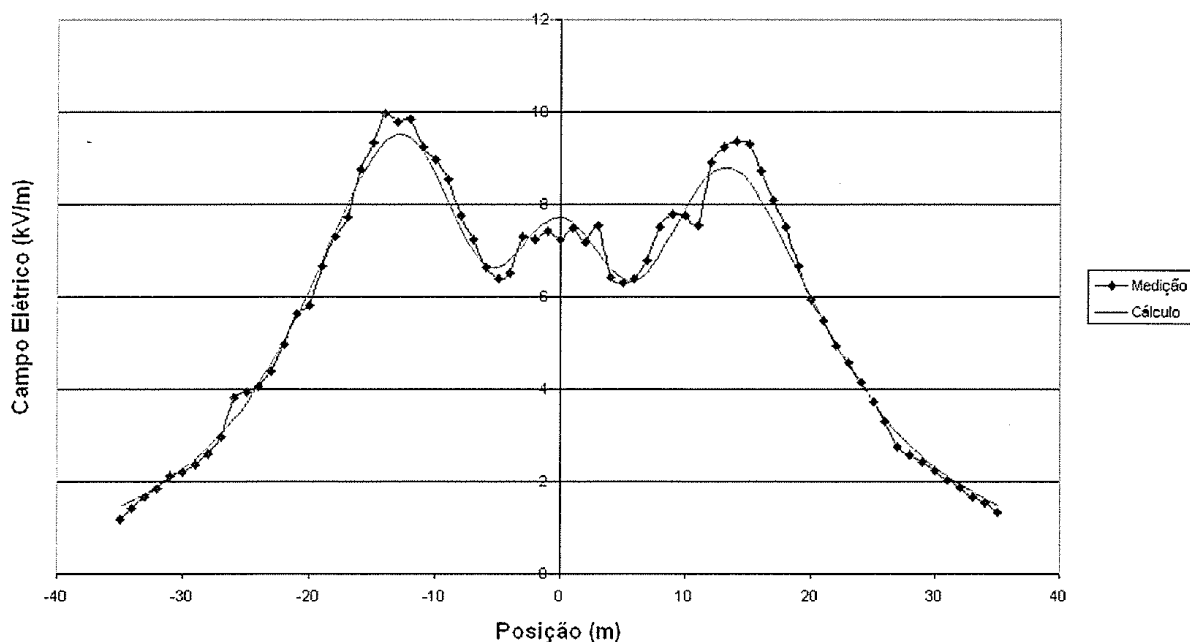


Figura 7.19 – Perfil transversal do campo elétrico da Seção 28.

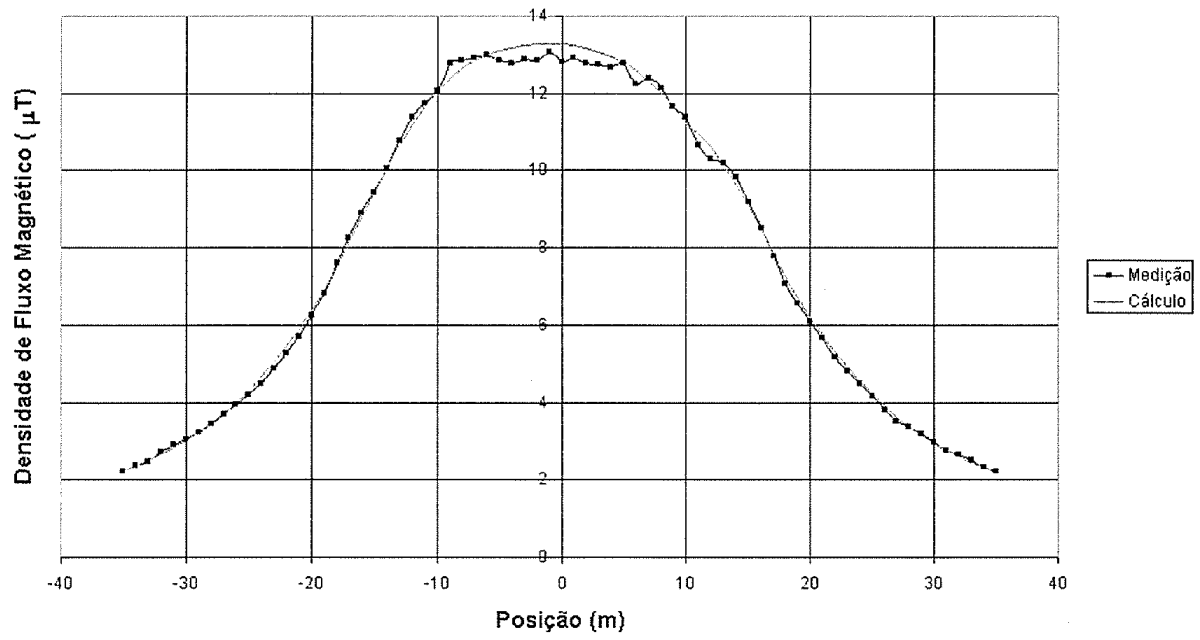


Figura 7.20 – Perfil transversal do campo magnético da Seção 28

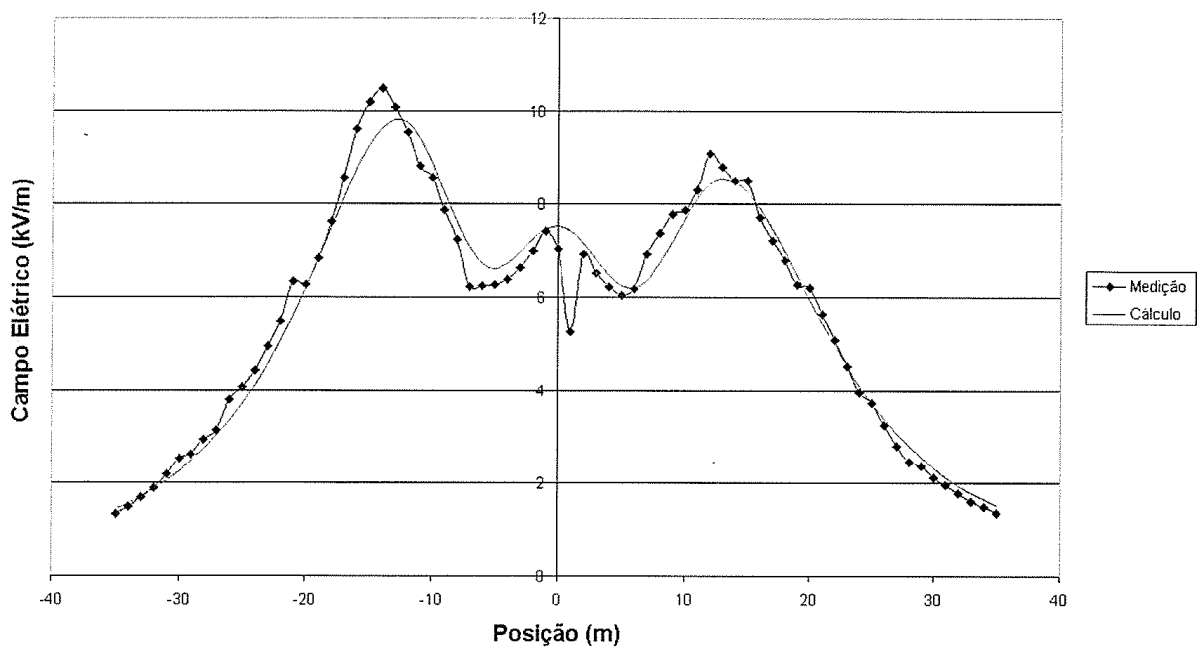


Figura 7.21 – Perfil transversal do campo elétrico da Seção 29

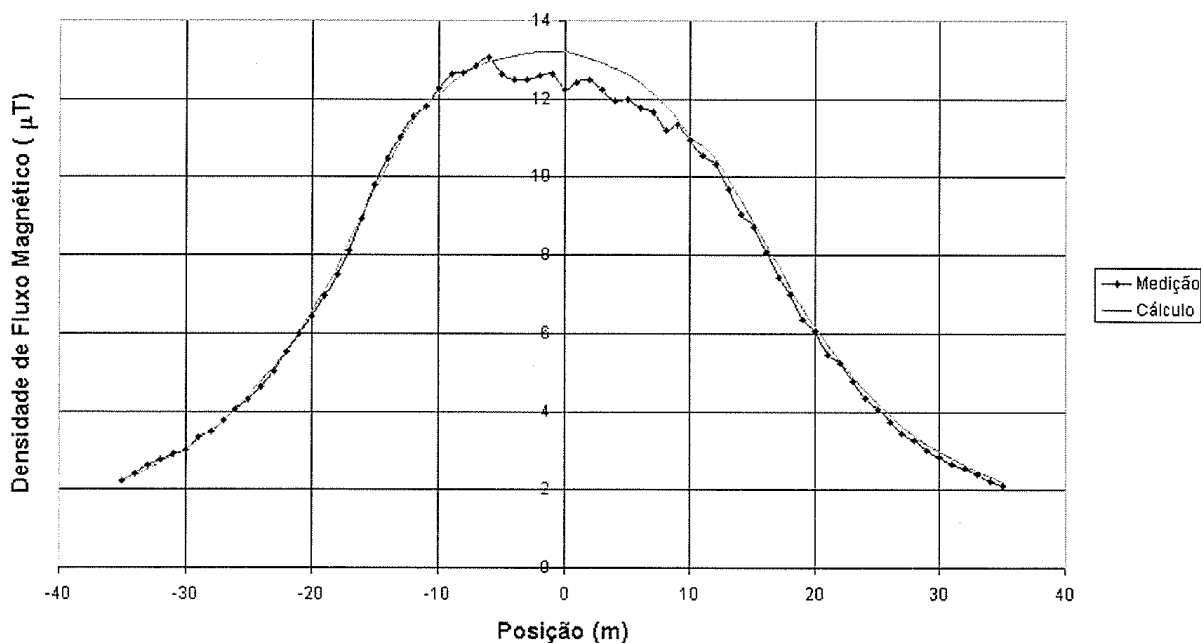


Figura 7.22 – Perfil transversal do campo magnético da Seção 29

Pequenas diferenças entre os valores medidos e calculados para o campo elétrico foram obtidos nos pontos localizados sob os condutores, sendo os valores calculados menores que os valores medidos na região sob as fases externas e maiores na região sob a fase central. A divergência nessa região foi de aproximadamente 9% para alguns pontos externos à projeção da linha de transmissão as diferenças foram menores, ficando em torno de 4%.

A densidade de fluxo magnético também apresentou pequenas diferenças entre valores medidos e calculados na região sob os condutores com uma divergência média de aproximadamente 8% e com diferenças da ordem de 2% nas regiões externos à projeção da linha de transmissão.

#### 7.2.4 Análise dos resultados

Os resultados apresentados mostram que os valores máximos foram de 13,30  $\mu\text{T}$  para a densidade de fluxo magnético e 10,48 kV/m para o campo elétrico, medidos dentro da faixa de servidão. Observa-se que a intensidade do campo elétrico ultrapassa os *níveis de referência* recomendados pela *ICNIRP*, que é de 8,33 kV/m para a População Ocupacional.

### 7.3 Campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV calculados com a utilização do programa CAMPEM

Em seu trabalho monográfico do curso de graduação em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, denominado *Estudo da*

*exposição humana a campos elétricos e magnéticos da frequência industrial utilizando métodos numéricos* (2009), Rafael Monteiro da Cruz Silva faz uma excelente abordagem sobre o assunto.

No Capítulo 6 do referido trabalho o autor discorre sobre alternativas para mitigação dos níveis de campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão aéreas. Para isso são realizados cálculos de campo elétrico e magnético de uma linha de transmissão de 500 kV com arranjo horizontal.

Um das alternativas apontadas pelo autor é justamente a modificação da altura dos condutores em relação ao solo.

Na Tabela 7.3 são mostrados os parâmetros da linha de 500 kV para a realização dos cálculos.

Tabela 7.3 - Características da linha de transmissão de 500 kV

|  |        |
|--|--------|
| Tensão máxima de operação:             | 550 kV |
| Corrente de linha:                     | 2000 A |
| Comprimento do vão:                    | 400 m  |
| Altura dos condutores de fase:         | 28 m   |
| Distância entre fases:                 | 10 m   |
| Número de condutores do feixe:         | 4      |
| Espaçamento entre condutores do feixe: | 0,45 m |
| Largura da faixa de servidão:          | 50 m   |
| Condutor:                              | Rail   |
| Altura dos cabos pára-raios            | 34 m   |
| Flexa                                  | 18 m   |

### 7.3.1 Cálculo dos perfis de campo elétrico e magnético.

Para o cálculo dos perfis de campo elétrico e magnético foi utilizado o Programa CAMPEM. A Figura 7.23 mostra os resultados gráficos.

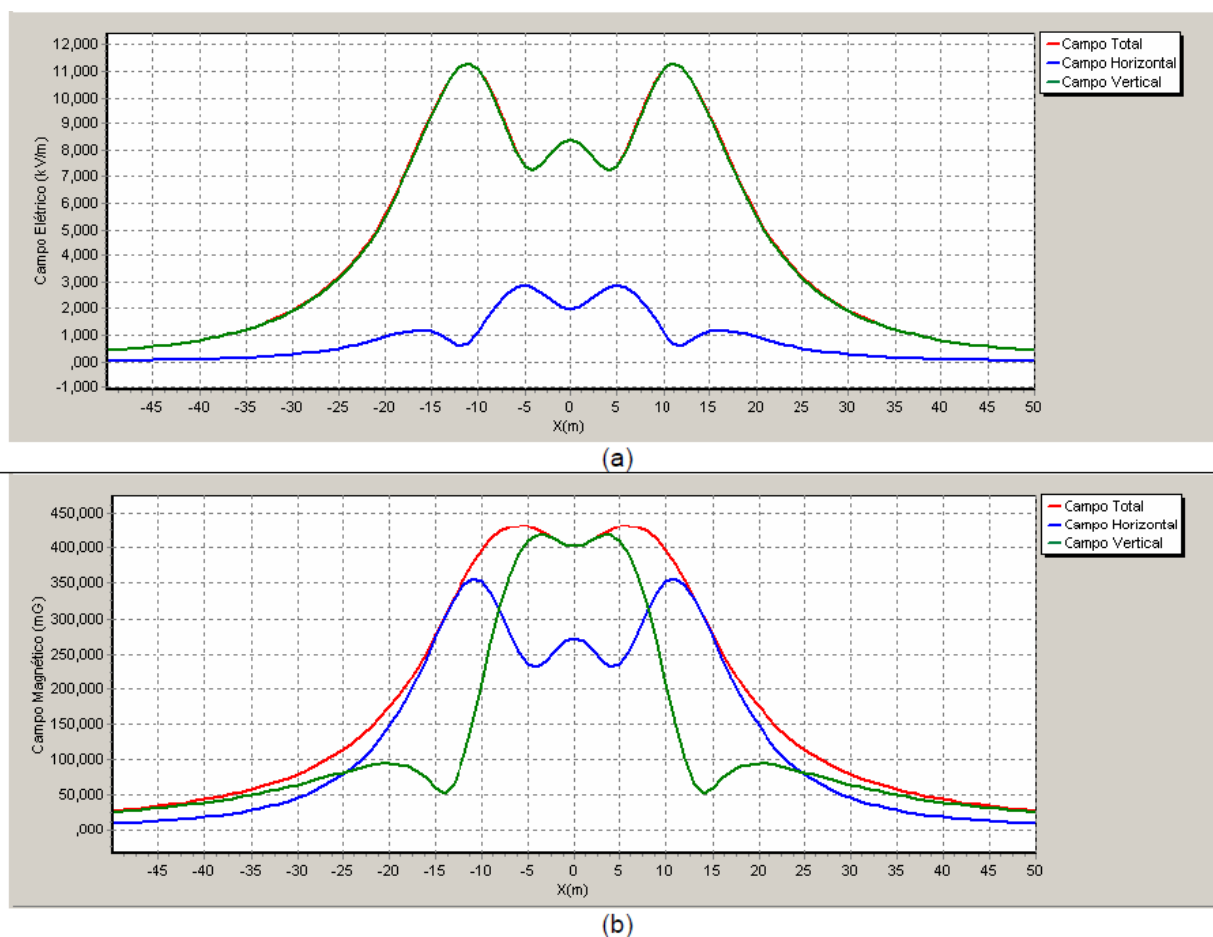


Figura 7.23 – Perfis transversais de campo elétrico (a) e campo magnético (b), a 1,5 m do solo

Observa-se que campo elétrico máximo calculado no interior da Faixa de Servidão foi igual a 11,3 kV/m, ultrapassando assim os *Níveis de Referência* (8,33 kV/m para População Ocupacional) determinado pela Resolução Normativa nº 398 da ANEEL, o que demandará a necessidade de elaboração do *Relatório de Conformidade* para a demonstrar o atendimento às *Restrições Básicas*, ou em caso negativo o *Relatório de Conformidade* e o *Plano de Adequação*, conforme art. 7º da Resolução Normativa nº 398/2010 da ANEEL.

Por outro lado, o campo magnético máximo alcançou o valor de 0,4  $\mu$  T, valor bem inferior aos *Níveis de Referência*.

Na Figura 7.24 é mostrado o resultado gráfico da relação entre a variação da altura dos condutores de fase ao solo e o campo elétrico máximo medido no limite da faixa de passagem (FP), ou faixa de servidão, bem como no interno da mesma.

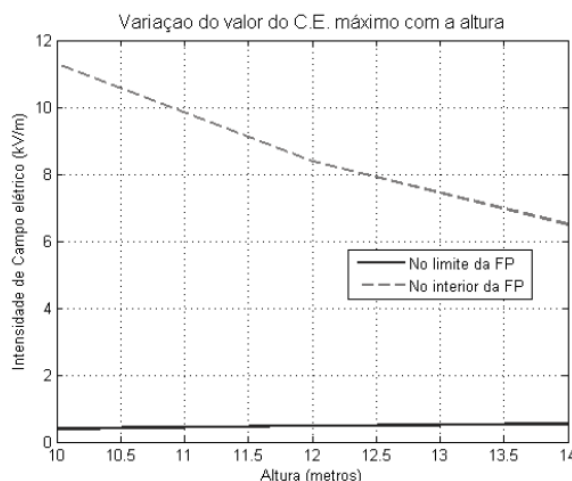


Figura 7.24 – Variação do valor do campo elétrico máximo com a altura dos condutores-fase

## 7.4 Medições e cálculos de campos elétricos de uma linha de transmissão de 750 kV

Nesta seção será feita uma explanação sobre as medições e os cálculos de campos elétricos de uma linha de transmissão de 750 kV de FURNAS, que transporta parte da energia elétrica gerada na Usina de Itaipu para o sudeste brasileiro. Os resultados desse trabalho foram apresentados no XII ERIAC - Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, realizado em Foz do Iguaçu-Pr de 20 a 24 de maio de 2007, cujo artigo foi publicado sob o título *Desenvolvimento de modelos eletrogeométricos para as linhas de transmissão de Furnas*, de autoria de MPALANTINOS NETO *et al.* (2007).

### 7.4.1 Características da linha de transmissão

Foi selecionado um vão real de uma linha de transmissão de FURNAS, localizada no estado do Paraná. Trata-se de uma linha denominada LT Itaberá – Tijuco Preto, e o vão estudado situa-se entre as estruturas 374 e 375. A Figura 7.23 retrata o ambiente do vão em destaque.

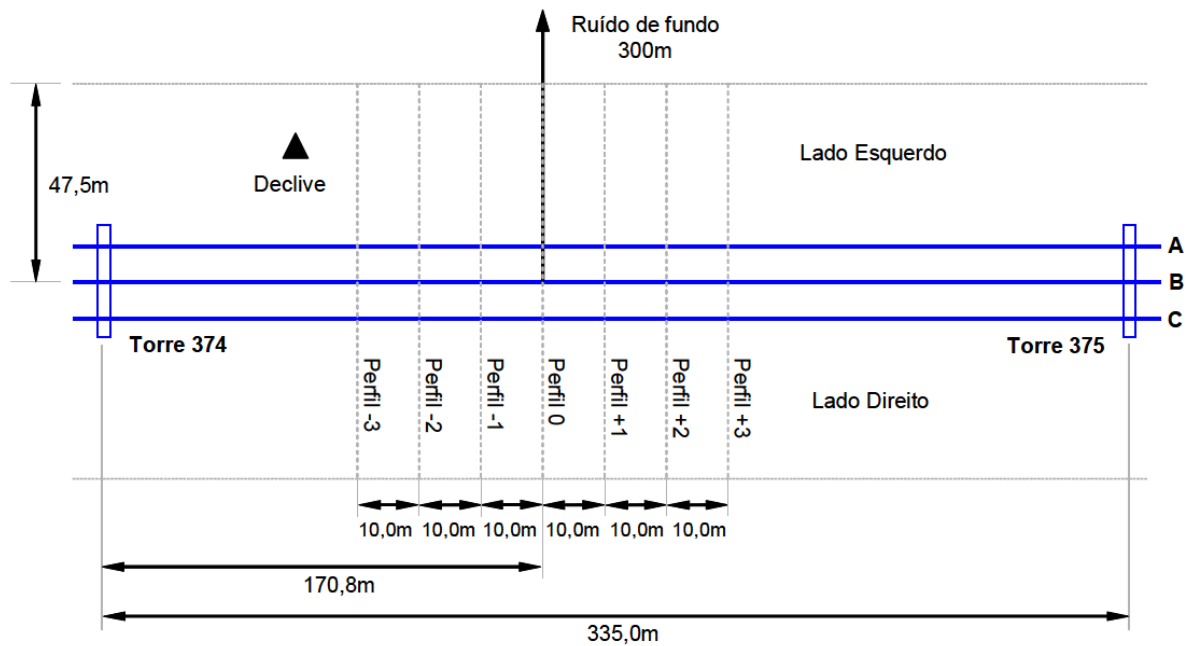


Figura 7.25 - Ambiente do vão da linha de transmissão de 750 kV de Furnas

#### 7.4.2 Resultados das medições e cálculos de campos elétricos

A Figura 7.24 mostra os resultados calculados e os valores medidos para um perfil de campo elétrico transversal no ponto do condutor mais baixo (perfil 0 da Figura 8) a 1,5m de altura na linha de transmissão de 750kV. Os valores medidos, em todos os perfis, estão representados na Figura 7.25.

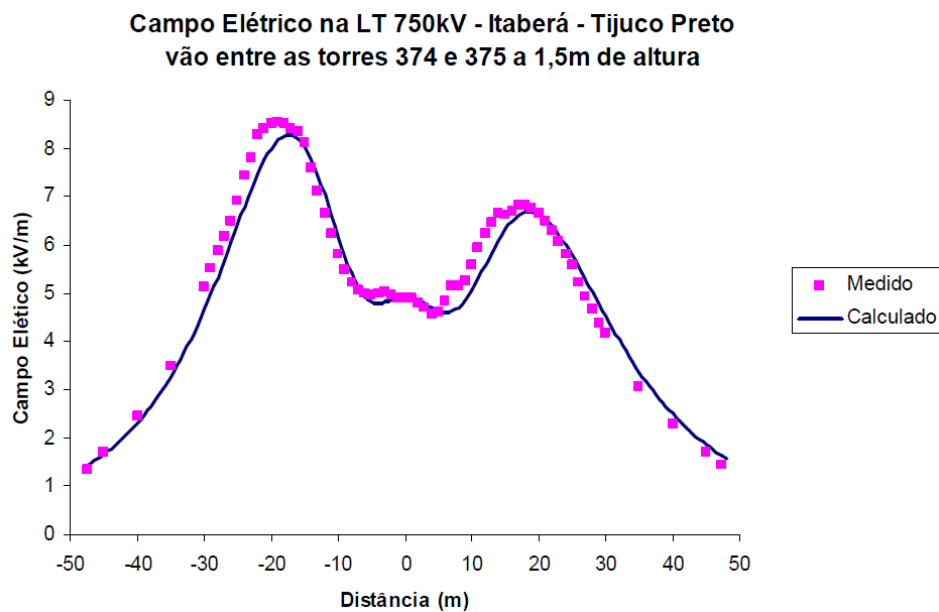


Figura 7.24 - Perfil de campo elétrico transversal no ponto mais baixo da linha.



A Figura 7.25, a seguir, mostra o resultado gráfico dos valores medidos em todos os perfis.

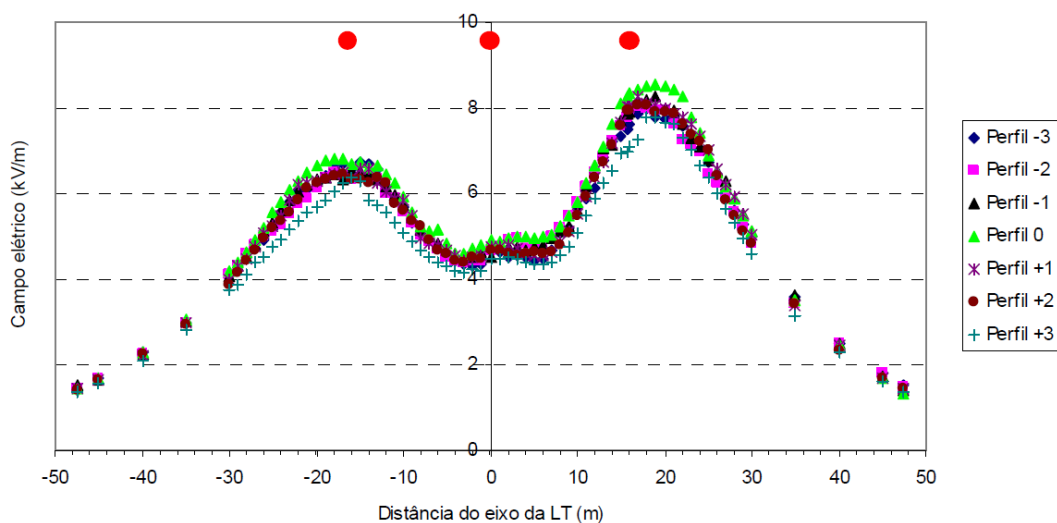


Figura 7.27 - Perfil de campo elétrico transversal medidos em todos os perfis da linha.

#### 7.4.3 Análise dos resultados

Os resultados apresentados mostram que o valor máximo de campo elétrico ficou em torno de 8,5 kV/m, medidos dentro da faixa de servidão, ultrapassando assim os *níveis de referência* recomendados pela *ICNIRP*, que é de 8,33 kV/m para a População Ocupacional.

## CONCLUSÕES

Conclui-se inicialmente que a presença, no meio ambiente, de ondas elétricas e magnéticas geradas pelas linhas de transmissão de energia elétrica constitui uma forma de poluição atmosférica, haja vista que estas alteram o estado natural da camada de ar que envolve a terra. Com isso, é evidente que a operação das linhas de transmissão de energia elétrica impactam o meio ambiente na medida em que introduzem neste uma certa quantidade de energia. Apesar disso não há certeza científica para se afastar totalmente a possibilidade dessas ondas causarem efeitos adversos à saúde humana.

A metodologia de cálculos baseada na simulação de carga apresenta resultados satisfatórios quando em comparação com valores medidos.

A nova lei representa um avanço para o setor elétrico brasileiro na medida que traz regras claras para a operação de linhas de transmissão de energia elétrica, todavia pode representar um entrave para a expansão e modernização do setor, haja vista que para instalações com tensões superiores 500 kV a emissão de campos elétricos pode ultrapassar os limites estabelecidos.

A Resolução da ANEEL apresenta falhas na medida que não determina que as medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos sejam realizadas por empresas credenciadas pelo Inmetro.

Faz-se necessário que a ANEEL estabeleça uma metodologia para a fiscalização dos procedimentos adotadas pelos agentes para o cumprimento dos limites de campos elétricos e magnéticos estabelecidos.

Desde já todo titular de unidade consumidora poderá exercer seu direito de requisitar à distribuidora, mediante solicitação formal, a medição dos campos elétricos e magnéticos gerados por instalações de tensão igual ou superior a 2,3 kV, aí incluindo-se redes de distribuição, linhas de transmissão e subestações. Observa-se todavia que, caso os valores medidos sejam inferiores aos Níveis de Referência, o consumidor deve arcar com os custos decorrentes desse procedimento, devendo a distribuidora informar tudo previamente ao interessado, sob pena de sofrer das penalidades previstas em regulamento específico da ANEEL.

Resta à ANEEL divulgar em seu no sítio na rede mundial de computadores todos os dados já enviados pelos agentes, visto que até o fechamento do presente trabalho nada ainda tinha sido feito nesse sentido.

Com base nas experiências da COELCE e da CHESF, é para as instalações com tensão menor ou igual a 230 kV não haverá violação dos Níveis de Referência estabelecidos pelo ICNIRP. Outrossim, os valores de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV da CEMIG e de 750 kV de FURNAS mostram a violação dos *Níveis de Referência* estabelecidos na Resolução Normativa nº 398/2010 da ANEEL, o que implica na necessidade de elaboração de *Relatório de Conformidade* para demonstração de que os resultados atendem às *Restrições Básicas*, ou, caso contrário, deve-se elaborar o *Relatório de Conformidade* e o *Plano de Adequação*, conforme prevê o artigo 7º da referida resolução.

## REFERÊNCIAS

ABRICEM - Associação Brasileira de Compatibilidade Magnética. **Linhas de Transmissão Campos Elétricos e Magnéticos**. Maio 2004 Disponível em: <[http://www.abricem2.com.br/web3/index.php?option=com\\_content&view=article&id=69&Itemid=171&showall=1](http://www.abricem2.com.br/web3/index.php?option=com_content&view=article&id=69&Itemid=171&showall=1)>. Acesso em 24 de fevereiro de 2011.

BASTOS, J. P. A; SADOWSKI, Nelson. Electromagnetics Modeling by Finite Element Methods. New York: Marcel Dekker, 2003.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, DF: ANEEL, 2002.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Energia Elétrica. Duto de Informações. Brasília, DF: ANEEL, 2011. Disponível em: <<http://duto.aneel.gov.br/duto> > . Acesso em: 7 out. 2011.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Energia Elétrica. Informações Técnicas: Informações Georeferenciadas. Brasília: ANEEL, 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=544&idPerfil=2> > . Acesso em: 7 out. 2011.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Energia Elétrica. Proposta de regulamentação da Lei nº 11.934/2009, no que se refere aos limites de exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Nota Técnica nº 122/2009-SDR/ANEEL. Brasília: ANEEL, 2009. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2009/047/documento/nota\\_tecnica\\_0122.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2009/047/documento/nota_tecnica_0122.pdf) > . Acesso em: 7 out. 2011.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Nº 66, de 16 de abril de 1999. Estabelece a composição da Rede Básica do sistema elétrico interligado brasileiro, suas conexões e as respectivas empresas usuárias das instalações. Brasília, DF: ANEEL, 1999. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/RES1999066.pdf> > . Acesso em: 7 out. 2011.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa Nº 191, de 19/12/2005. Estabelece os procedimentos para a determinação da capacidade operativa das instalações de transmissão integrantes da Rede Básica e das Demais Instalações de Transmissão, componentes do Sistema Interligado Nacional, bem como define as Funções Transmissão e os respectivos Pagamentos Base. Brasília, DF: ANEEL, 2005. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2005191.pdf> > . Acesso em: 7 out. 2011.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa Nº 398, de 23/03/2010. Regulamenta a Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários das instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, na frequência de 60 Hz. Brasília, DF: ANEEL, 2010 Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2010398.pdf> > . Acesso em: 7 out. 2011.

\_\_\_\_\_. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

\_\_\_\_\_. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15415 – Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para o uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF: CONAMA, 1986 Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>> . Acesso em: 7 out. 2011

\_\_\_\_\_. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília: Senado, 1988.

\_\_\_\_\_. Decreto nº 5.081, de 14 de maio de 2004. Regulamenta os arts. 13 e a4 da Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998, e o art. 23 da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, que tratam do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. Brasília, DF: Presidência da República, 1981. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5081.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5081.htm)>. Acesso em: 4 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1981. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm)>. Acesso em: 4 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1996. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9427cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427cons.htm)>. Acesso em: 4 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2011. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9478.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9478.htm)>. Acesso em: 4 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1998. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm)>. Acesso em: 4 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998. Altera dispositivos das Leis nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 8.666, de 21 de julho de 1993, nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e autoriza o Poder Executivo a promover a reestruturação das Centrais Elétricas Brasileiras – ELETROBRÁS e de suas subsidiárias e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1998. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9648compilada.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9648compilada.htm)>. Acesso em: 4 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2004. Disponível em: <[http://www.presidencia.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2004/L10.847.htm](http://www.presidencia.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/L10.847.htm)>. Acesso em: 4 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2004, 10.438, de 26 de abril de 2002 e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2004. Disponível em: <[http://www.presidencia.gov.br/ccivil\\_03/Ato2004-2006/2004/L10.848.htm](http://www.presidencia.gov.br/ccivil_03/Ato2004-2006/2004/L10.848.htm)>. Acesso em: 4 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009. Dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos; altera a Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2009. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2009/Lei/L11934.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L11934.htm)>. Acesso em: 4 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Projeto de Lei nº 2.576, de 2000. **Internet**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2007. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/3996998.pdf>> . Acesso em: 16 abr. 2007.

BOSCATO, Flávio; SANTO, DAL SANTO, Mariane, PERES, Conrado. Análise da Legislação Ambiental na Faixa de Servidão de Linha de Transmissão da Energia no Estado de Santa Catarina COBRAC 2008. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO. Florianópolis: UFSC, 2008.

CAVALCANTI NETO, Tomas Nunes. **Revisão bibliográfica sobre efeitos adversos dos campos eletromagnéticos à saúde humana**. Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza: 2005

CAVALCANTI, Themistocles Brandão. **Princípios gerais de direito público**. 3. ed. Rio de Janeiro: Borsoi, 1966.

DENO, D. W. Transmission Line Fields. **IEEE Transactions on Power Apparatus and System**, vol. PAS-86, nº 4, pp. 493-498, Abr. 1967

DOMINGUES, L. A. de M. C; PINTO, R. L. F; BARBOSA, R. C. N. Avaliação do desempenho de linha de transmissão – Cálculo de campos elétricos, magnéticos e induções – Programa CAMPEM. Relatório Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, Rio de Janeiro: 2007

EFEITOS da Implantação de Linhas de Transmissão em Regiões Densamente Povoadas. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Curitiba: 2005.

ELETROPAULO tenta suspender decisão que determinou redução de campos eletromagnéticos. Notícias do STF. Brasília, DF: Supremo Tribunal Federal, 2011. Disponível em: <<http://www.stf.jus.br/portal/cms/verNoticiaDetalhe.asp?idConteudo=165841>>. Acesso em: 20 nov 2011.

ELGERD, Oll I. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica**. São Paulo: MacGraw-Hill do Brasil, 1976.

FERREIRA, Caio Mário da Silva. **Instituições de direito civil**. 8. ed. Rio de Janeiro: Forense, 1984.

FEYCHTING, M.& AHLBOM, A. **Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high voltage power lines**. American Journal of Epidemiology. 7:467-481, 1993.

FEYCHTING, M.; FORSSEN, U.; RUTQUIST, L.E. **Magnetic fields and breast cancer in Swedish adults residing near high-voltage power lines**. Epidemiology, 9:392-397, 1998.

FIORILLO, Celso Antônio Pacheco. **Curso de Direito Ambiental Brasileiro**. 7. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

FOSTER, Kenneth R. **O princípio da precaução: Bom senso ou extremismo ambiental?:** Tradução por Hamilton Moss. Disponível em: <[http://www.seas.upenn.edu/~kfooster/Foster\\_precautionary\\_Portuguese.pdf](http://www.seas.upenn.edu/~kfooster/Foster_precautionary_Portuguese.pdf)>. Acesso em: 7 out. 2011.

\_\_\_\_\_. *The precautionary principle – Common Sense or Enviromental Extremism?* IEEE Technology and Society Magazine, Winter 2002/2003.

GUIMARÃES, Gernan Edson. **Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV**. 2005, 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/456M.pdf>>. Acesso em: 4 maio. 2011.

HOUAISS, A. (Ed.). **Enciclopédia Mirador Internacional**. São Paulo; Rio de Janeiro: Encyclopédia Brittanica do Brasil Publicações, 1975.

ICNIRP – International Comission on Non-Ionizing Radiation Protection. **Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and eletromagnetics fields**. Health Physics vol. 74, pp. 494-522, abr 1998.

LEFOREST, J. **Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above**. 2. ed. EPRI. California: 1982

LIU, J.; RUAN, W.; DAWALIBI, F. P. **Electromagnetic Fields Near High Voltage Eletrical Power Lines: A Parametrics Analysis**. Safe Engeneering Services & Technologies Ltd. Montreal: 2002.

LONDON S.J.; THOMAS, D.C.; BOWMAN, J.D.; SOBEL, E.; CHENG, T.C.; PETERS, J.M. **Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia**. American Journal of Epidemiology, 134: 923-937, 1991

LONDON, S.J.; POGODA, J.M.; HWANG, K.L.; LANGHOLZ, B.; MONROE, K.R.; KOLONEL, L.N.; KAUNE, W.T.; PETERS, J.M.; BRIAN, E. **Residential magnetic field exposure and breast cancer risk: a nested case-control study from a multiethnic cohort in Los Angeles County, California**. American Journal of Epidemiology, 158: 969-980, 2003.

MPALANTINOS NETO, A. *et al.* Desenvolvimento de modelos eletromagnéticos para as linhas de transmissão de Furnas. In: ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRÉ, 12. Foz do Iguaçu. Anais eletrônicos... Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 2007. Disponível em: <<http://www.abrasco.com.br/epirio98/>>. Acesso em: 7 out. 2011.

MILARÉ, Edis. **Direito ambiental:** doutrina, jurisprudência, glossário. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2005.

MIRRA, Álvaro Luiz Valery. Princípios fundamentais do Direito Ambiental. **Revista de Direito Ambiental**, São Paulo: RT, n. 2, 1996.

OLIVEIRA, F. H.; WOSNY G. C., DAL SANTO, M. A., Sistema de Informação Geográfica apoiando o mapeamento temático e o cadastro das linhas de transmissão de energia elétrica COBRAC 2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO. Florianópolis: UFSC, 2006.

PEREIRA, Caio Mário da Silva. **Instituições de direito civil**. 8. ed. Rio de Janeiro: Forense, 1984.

PLONUS, Martin. **Applied Electromagnetics**. MacGraw-Hill, 1978.

REQUEJO, Carlos M. **Estrés de alta tensión**. Madri: Didaco, 1999.

SCHOENFELD, E.R.; O'LEARY, E.S.; HENDERSON, K.; GRIMSON, R.; KABAT, G.C.; AHN, S.; KAUNE, W.T.; GAMMON, M.D.; LESKE, M.C. **Electromagnetic fields and breast cancer on Long Island:** a case-control study. American Journal of Epidemiology, 158:47-58, Long Island: 2003.

SHADIKU, Mathew. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3. ed. São Paulo: Bookman, 2004.

SILVA, Rafael Monteiro da Cruz. **Estudo da exposição humana a campos elétricos e magnéticos da frequência industrial utilizando métodos numéricos**. 2009, 116f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001040.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2011.

SOUZA, H. M. de, OLIVEIRA, P. B. G. de. **Avaliação de Medições de Campos Elétricos e Magnéticos Linha de Transmissão 230 kV – Fortaleza-Delmiro Gouveia da CHESF**. Relatório Técnico ACET-473/99. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: 1999.

STEVENSON JR, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 48. ed. São Paulo: MacGraw-Hill do Brasil, 1978.



TYNES, T. & HALDORSEN, T. **Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines**. American Journal of Epidemiology, 145:219-226, 1997.

WORLD Health Organization. **Electromagnetics fields and public health**: USA: Word Health Organization Press Office, 2000. Disponível em: <[http://www.who.int/docstore/peh-emf/publicaions/facts\\_press/EMF-Precaution.htm](http://www.who.int/docstore/peh-emf/publicaions/facts_press/EMF-Precaution.htm)>. Acesso em: 7 out. 2011.