

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Caio Augusto Fonseca de Freitas**

**Software Baseado em MATLAB® para Cálculo  
e Análise Tridimensional de Campos Elétricos e  
Magnéticos em Linhas de Transmissão**

João Pessoa

2017



Caio Augusto Fonseca de Freitas

**Software Baseado em MATLAB® para Cálculo e Análise  
Tridimensional de Campos Elétricos e Magnéticos em  
Linhas de Transmissão**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Universidade Federal da Paraíba como exi-  
gência para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Energias Alternativas e Renováveis  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Helon David de Macêdo Braz

João Pessoa

2017

© Caio Augusto Fonseca de Freitas

F866s Freitas, Caio Augusto Fonseca de

Software baseado em MATLAB® para cálculo e análise tridimensional de campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão. / Caio Augusto Fonseca de Freitas. – João Pessoa, 2017.

62 p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Helon David de Macêdo Braz.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Transmissão de energia elétrica. 2. Linhas de transmissão. 3. Campos elétricos. 4. Campos magnéticos. 5. MATLAB®. I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed 621.315(043).

Caio Augusto Fonseca de Freitas

## Software Baseado em MATLAB® para Cálculo e Análise Tridimensional de Campos Elétricos e Magnéticos em Linhas de Transmissão

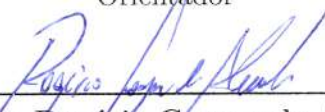
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Paraíba como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. João Pessoa, 24 de novembro de 2017:



---

Prof. Dr. Helon David de Macêdo Braz  
UFPB  
Orientador



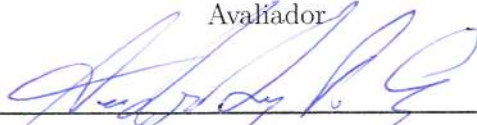
---

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida  
UFPB  
Avaliador



---

Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez  
UFPB  
Avaliador



---

Eng. André Luiz Pereira da Cruz  
Companhia Hidro Elétrica do São Francisco  
Avaliador

João Pessoa

2017



# Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida e por sempre guiar meus passos.

Aos meus pais, Nildo e Gilma, e meu irmão Felipe, por estarem sempre ao meu lado, e por todo o esforço feito até aqui para me oferecer as melhores oportunidades.

À minha namorada, Maria Luiza, por todo o suporte e apoio de sempre e por acreditar mais em mim do que eu mesmo. Estendo o agradecimento à sua família, por também serem minha família.

Aos amigos que fiz durante a graduação e intercâmbio, em especial Filype, Guilherme e Luanna, por compartilharem conhecimento e momentos de felicidade e de preocupação.

Ao Prof. Helon, por ter tornado este trabalho prazeroso através das reuniões sempre bem-humoradas. Obrigado pela amizade. “Seu trabalho é muito importante!”.

Aos engenheiros da CHESF André, Gustavo e Oswaldo, por toda a contribuição dada a este trabalho.

Aos professores Rogério e Yuri, por terem prontamente aceitado participar da banca avaliadora e pelas valiosas contribuições ao trabalho. E ao Prof. José Maurício, também pela sua contribuição.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPB, por terem nos transmitido todo o conhecimento necessário para que nos tornemos excelentes profissionais.

E a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.





# Resumo

Com a publicação do relatório apresentado por Wertheimer e Leeper (1979) apontando uma possível associação entre o câncer infantil e os campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão de energia, a preocupação com estes campos aumentou, levando à realização de vários estudos sobre o assunto. Apesar de evidências concretas desta relação não terem sido encontradas, foram criadas normas que estabelecem limites para a exposição humana aos campos gerados pelo sistema de transmissão. Tendo em vista respeitar estas normas, mesmo em fase de projeto estes campos são calculados e análises são realizadas para verificar se os resultados cumprem ou não os regulamentos. Visando facilitar esta análise, este trabalho propõe um *software*, baseado em MATLAB®, que realiza o cálculo dos campos gerados por linhas de circuitos simples e duplos e apresenta como resultado gráficos tridimensionais. A validação da proposta foi feita através de estudos de caso, em que três linhas de transmissão da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco foram analisadas pelo *software* e os resultados foram comparados com relatórios de estudos feitos pela empresa.

**Palavras-chave:** Transmissão de Energia Elétrica, Linhas de Transmissão, Campos Elétricos, Campos Magnéticos, MATLAB®.



# Abstract

With the publication of the report presented by Wertheimer and Leeper (1979) pointing to a possible association between childhood cancer and the electric and magnetic fields generated by power transmission lines, the concern about those fields has increased, leading to a number of studies on the subject. Although concrete evidence of this relationship was not found, rules were created establishing limits for human exposure to the fields generated by the transmission system. In order to comply with these standards, even at the designing stage, the fields are calculated and analyzed. The objective of this process is to verify whether the results meet the regulations or not. This work proposes a MATLAB® based software, which aims to facilitate this analysis. It calculates the fields generated by single and double circuit lines, and presents three-dimensional graphs as a result. The validation of the proposed software was made through case studies, in which three transmission lines of the Companhia Hidro Elétrica do São Francisco were analyzed, and the results were compared with reports about studies previously made by the company.

**Keywords:** Electric Power Transmission, Transmission Lines, Electric Fields, Magnetic Fields, MATLAB®.



# Lista de ilustrações

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 – Sistema Elétrico de Potência. . . . .   | 17 |
| Figura 1.2 – Matriz Brasileira de Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica. . . . .               | 18 |
| Figura 1.3 – Mapa do Sistema Interligado Nacional (SIN). . . . .   | 19 |
| Figura 2.1 – Elipse do campo elétrico e variação deste com o tempo. . . . .                                  | 24 |
| Figura 2.2 – Campo elétrico e superfícies equipotenciais em um condutor. . . . .                             | 25 |
| Figura 2.3 – Campo elétrico de um condutor suspenso sobre o solo. . . . .                                    | 26 |
| Figura 2.4 – Método das imagens. . . . .   | 27 |
| Figura 2.5 – Condutores e suas imagens. . . . .  | 28 |
| Figura 2.6 – Conjunto de condutores de uma fase $i$ hipotética. . . . .                                      | 28 |
| Figura 2.7 – Cálculo do campo elétrico em um ponto M no espaço. . . . .                                      | 29 |
| Figura 2.8 – Campo magnético em torno de um condutor cilíndrico. . . . .                                     | 30 |
| Figura 2.9 – Cálculo do campo magnético em um ponto M no espaço. . . . .                                     | 31 |
| Figura 2.10 – Altura dos condutores assumida para os cálculos. . . . .                                       | 33 |
| Figura 2.11 – Condutor suspenso por dois suportes de mesma altura. . . . .                                   | 34 |
| Figura 3.1 – Eixos adotados em um sistema de transmissão. . . . .  | 37 |
| Figura 3.2 – Análise Faixa de servidão x Altura, para diferentes valores de vão. . . . .                     | 38 |
| Figura 3.3 – Análise Vão x Altura, para diferentes valores de faixa de servidão. . . . .                     | 38 |
| Figura 3.4 – Análise Faixa de servidão x Vão, para diferentes valores de altura. . . . .                     | 39 |
| Figura 3.5 – Exemplo de planilha Excel® de entrada. . . . .  | 39 |
| Figura 3.6 – Interface inicial do <i>software</i> proposto. . . . .  | 41 |
| Figura 3.7 – Fluxograma de funcionamento do <i>software</i> proposto. . . . .                                | 41 |
| Figura 4.1 – LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II. . . . .  | 43 |
| Figura 4.2 – Entrada de dados para a LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II. . . . .                            | 44 |
| Figura 4.3 – Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo elétrico, para uma altura de<br>1 m. . . . .           | 44 |
| Figura 4.4 – Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo magnético, para uma altura<br>de 1 m. . . . .          | 45 |
| Figura 4.5 – Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão. . . . .  | 45 |
| Figura 4.6 – Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o <i>software</i><br>proposto. . . . .  | 46 |
| Figura 4.7 – Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão. . . . .   | 46 |
| Figura 4.8 – Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o <i>software</i><br>proposto. . . . . | 47 |
| Figura 4.9 – LT 230 kV Jardim - Penedo. . . . .  | 48 |
| Figura 4.10 – Entrada de dados para a LT 230 kV Jardim - Penedo. . . . .                                     | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.11–Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo elétrico, para uma altura de 1 m. . . . .           | 49 |
| Figura 4.12–Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo magnético, para uma altura de 1 m. . . . .          | 49 |
| Figura 4.13–Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão. . . . .   | 50 |
| Figura 4.14–Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o <i>software</i> proposto. . . . .  | 50 |
| Figura 4.15–Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão. . . . .  | 51 |
| Figura 4.16–Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o <i>software</i> proposto. . . . . | 51 |
| Figura 4.17–LT 230 kV Campina Grande II - Natal II. . . . .  | 52 |
| Figura 4.18–Entrada de dados para a LT 230 kV Campina Grande II - Natal II. . .                          | 52 |
| Figura 4.19–Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo elétrico, para uma altura de 1 m. . . . .           | 53 |
| Figura 4.20–Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo magnético, para uma altura de 1 m. . . . .          | 53 |
| Figura 4.21–Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão. . . . .   | 54 |
| Figura 4.22–Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o <i>software</i> proposto. . . . .  | 54 |
| Figura 4.23–Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão. . . . .  | 55 |
| Figura 4.24–Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o <i>software</i> proposto. . . . . | 55 |
| Figura 4.25–Gráfico Altura x Vão do campo elétrico, no limite da faixa de servidão.                      | 56 |
| Figura 4.26–Gráfico Altura x Vão do campo elétrico, no limite da faixa de servidão.                      | 56 |

# Lista de abreviaturas e siglas

|       |   |
|-------|---|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica      |
| C     | Coulomb                                   |
| CA    | Corrente Alternada                        |
| CEM   | Campos Elétricos e Magnéticos             |
| CEPEL | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica   |
| CHESF | Companhia Hidro Elétrica do São Francisco |
| EPRI  | <i>Electric Power Research Institute</i>  |
| F     | Faraday                                   |
| FEB   | Frequência Extremamente Baixa             |
| G     | Gauss                                     |
| H     | Henry                                     |
| LT    | Linha de Transmissão                      |
| m     | Metro                                     |
| MSC   | Método de Simulação de Cargas             |
| OMS   | Organização Mundial da Saúde              |
| ONS   | Operador Nacional do Sistema Elétrico     |
| SEP   | Sistema Elétrico de Potência              |
| SIN   | Sistema Interligado Nacional              |
| T     | Tesla                                     |
| V     | Volt                                      |





# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                             | <b>17</b> |
| 1.1      | Sistema Elétrico de Potência                  | 17        |
| 1.2      | Delimitação do Trabalho                       | 19        |
| 1.3      | Motivação                                     | 20        |
| 1.4      | Objetivos                                     | 21        |
| 1.5      | Organização                                   | 21        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                  | <b>23</b> |
| 2.1      | Método Utilizado                              | 23        |
| 2.2      | Campo Elétrico                                | 24        |
| 2.3      | Campo Magnético                               | 29        |
| 2.4      | Linhas de Transmissão com Mais de Um Circuito | 32        |
| 2.5      | Comportamento Mecânico dos Condutores         | 33        |
| <b>3</b> | <b>IMPLEMENTAÇÃO</b>                          | <b>37</b> |
| 3.1      | Coordenadas em Sistemas de Transmissão        | 37        |
| 3.2      | Implementação do Método                       | 39        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS</b>                             | <b>43</b> |
| 4.1      | Estudos de Caso                               | 43        |
| 4.1.1    | LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II           | 43        |
| 4.1.2    | LT 230 kV Jardim - Penedo                     | 47        |
| 4.1.3    | LT 230 kV Campina Grande II - Natal II        | 52        |
| 4.2      | Conclusões do Capítulo                        | 57        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES</b>                             | <b>59</b> |
| 5.1      | Conclusões Gerais                             | 59        |
| 5.2      | Sugestões para Trabalhos Futuros              | 60        |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                            | <b>61</b> |



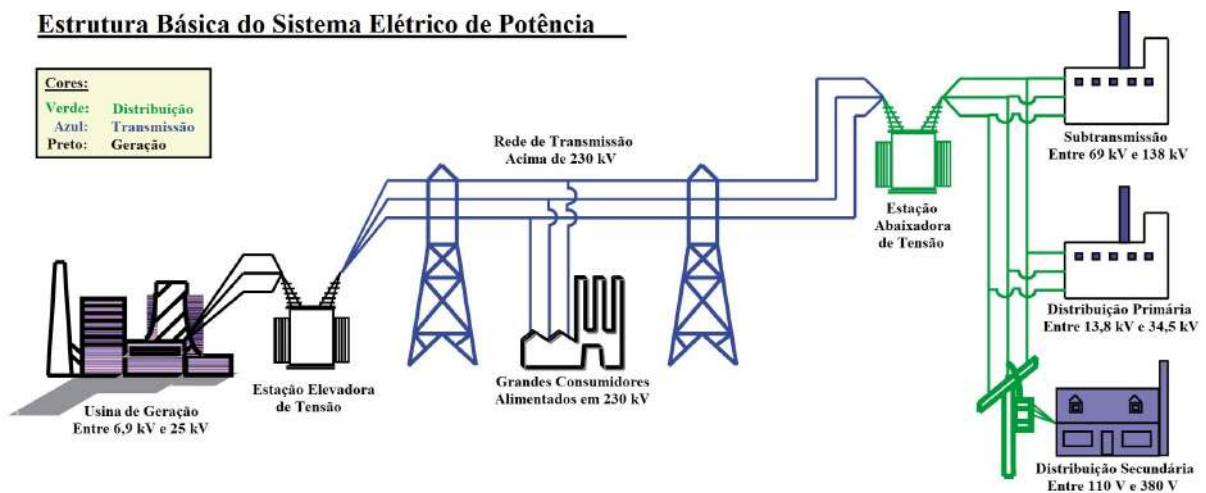
# 1 Introdução

Este capítulo é dividido em cinco seções. Uma visão geral sobre o sistema elétrico de potência é apresentada na primeira seção. Posteriormente é apontada a delimitação deste trabalho, incluindo tópicos que serão estudados. Na terceira parte é indicada a motivação para realização deste estudo, sendo esta seguida dos objetivos do trabalho. Ao final é feita uma descrição resumida da organização do trabalho.

## 1.1 Sistema Elétrico de Potência

Um sistema elétrico de potência (SEP) é uma estrutura complexa, geralmente interligada nacionalmente, que necessita de estudos para o seu planejamento e operação (PINTO, 2014). A estrutura básica do SEP compreende a geração, a transmissão e a distribuição da energia elétrica, como apresentado na Figura 1.1.

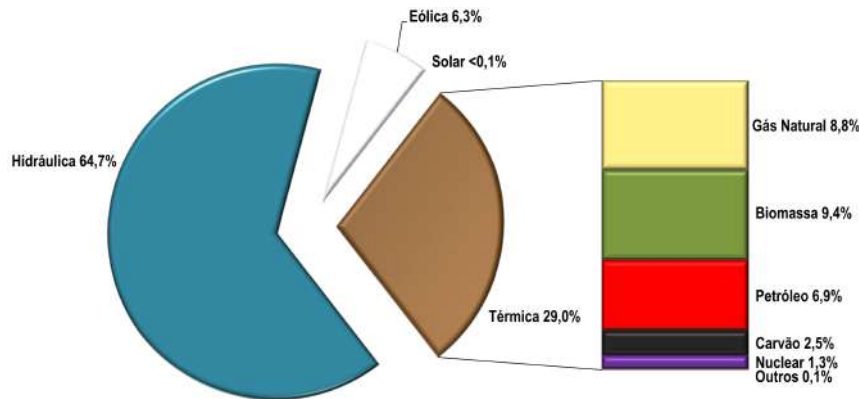
Figura 1.1 – Sistema Elétrico de Potência.



Fonte: Adaptado de <http://www2.econ.iastate.edu/classes/econ458/tesfatsion/images/ElectricPowerSystem.jpg>.

A geração consiste na conversão de uma energia primária (potencial hidráulica, solar, eólica, térmica, nuclear, etc.) em energia elétrica, fazendo uso, na maioria dos casos, de turbinas e geradores. Os níveis de tensão gerados estão normalmente entre 6,9 kV e 25 kV. No Brasil, devido a sua geografia, o perfil de geração de energia é predominantemente hidráulico, sendo responsável por 64,7% da capacidade instalada, seguido por usinas termelétricas com 29,0% e uma pequena parte de usinas eólicas, 6,3%, como apresentado na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Matriz Brasileira de Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica.



Fonte: Ministério de Minas e Energia (MME), 2016.

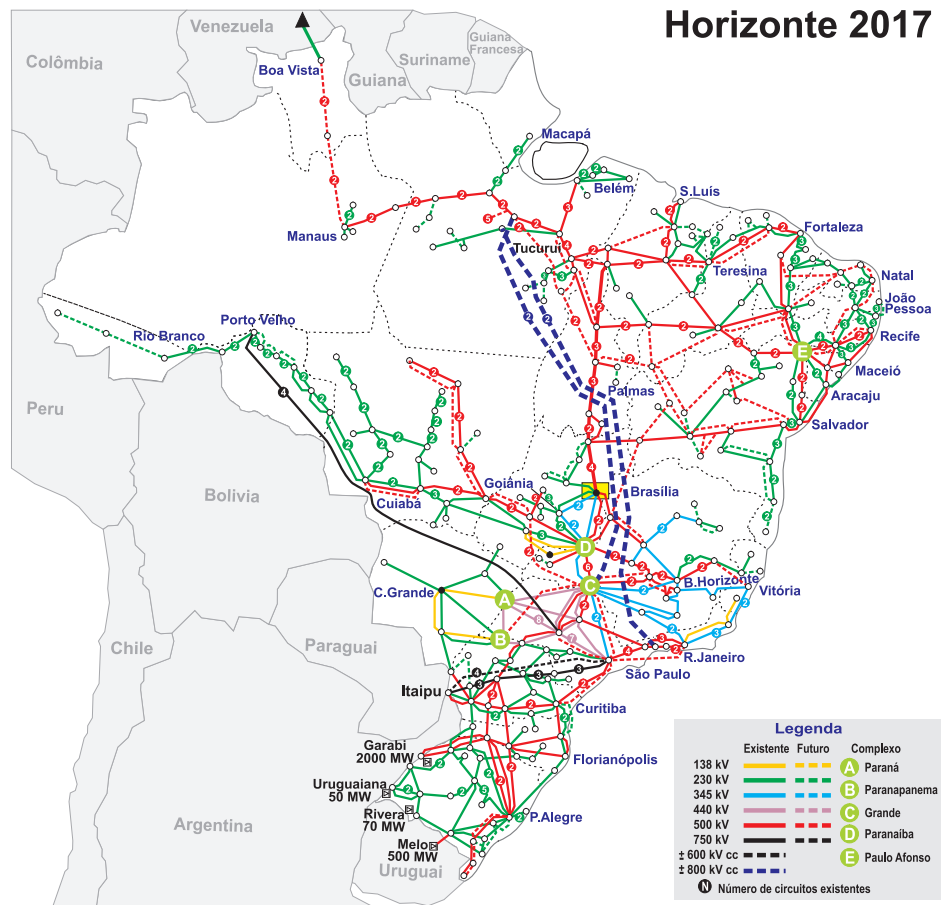
A transmissão consiste no transporte da energia gerada até as unidades de distribuição. A maior parte das linhas de transmissão (LTs) do Brasil têm amplas extensões, porque as grandes hidrelétricas geralmente estão instaladas a distâncias relevantes dos centros consumidores (PINTO, 2014). Para que a energia seja transmitida por essas longas distâncias, a tensão de saída dos geradores é elevada através de uma estação elevadora, como mostrado na Figura 1.1. Com isso, tem-se uma diminuição da queda de tensão nos condutores e das perdas por efeito Joule. Os níveis de tensão utilizados na transmissão estão entre 230 kV e 1000 kV. No entanto, esse limite superior não é fixo, visto que já existem LTs operando com tensão de 1100 kV em países como China e Japão (PINTO, 2014). Para definir o nível de tensão com o qual a LT vai operar, considera-se a distância entre a unidade de geração e a unidade de distribuição, o trajeto, a segurança e a potência solicitada. Para aumentar o nível de confiabilidade, esse sistema é fortemente malhado.

A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, permite a transferência de energia entre subsistemas e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias (ONS, 2017a). Com essa interconexão tem-se o Sistema Interligado Nacional (SIN), que é composto por todo o sistema de transmissão brasileiro, exceto por algumas localidades que são abastecidas por sistemas isolados, cujo consumo representa menos de 1% da carga total do país (ONS, 2017b). A operação do SIN é centralizada e feita pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), garantindo que as decisões de despacho de energia sejam tomadas de forma a contemplar as necessidades nacionais de abastecimento (ABRADEE, 2015). O mapa desse sistema está apresentado na Figura 1.3.

Ao fim da rede de transmissão, a tensão é reduzida por uma estação abaixadora, como mostrado na Figura 1.1. A partir daí tem-se o setor da distribuição, responsável pela entrega da energia aos consumidores finais. Esse setor é dividido em:

- Subtransmissão: seus níveis de tensão estão entre 69 kV e 138 kV. Opera como

Figura 1.3 – Mapa do Sistema Interligado Nacional (SIN).



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), 2017.

um intermediário entre a transmissão e a distribuição primária, além de alimentar alguns consumidores como *shoppings* e indústrias.

- **Distribuição Primária:** seus níveis de tensão estão entre 13,8 kV e 34,5 kV. Opera como alimentador da rede secundária, além de consumidores como pequenas indústrias e conjuntos comerciais.

- **Distribuição Secundária:** opera com níveis de tensão entre 110 V e 380 V e tem como finalidade alimentar consumidores residenciais e pequenos comércios.

## 1.2 Delimitação do Trabalho

Dentre os sistemas descritos anteriormente, este trabalho tem enfoque no sistema de transmissão, mais precisamente nas linhas de transmissão. Serão estudados os campos elétricos e magnéticos (CEM) gerados pelas LTs, como também a curva característica dos condutores no vão entre duas torres.

### 1.3 Motivação

Campos eletromagnéticos são campos elétricos e magnéticos acoplados, fenômeno que ocorre para campos de alta frequência (EPRI, 2005). Os CEM gerados pelas LTs estão em frequência padrão de 50 ou 60 Hz. Segundo o espectro de frequências, esses campos são definidos como sendo de frequência extremamente baixa (FEB), que vai de 3 Hz a 3 kHz, por isso trata-se esses campos de forma separada. No planejamento de novas linhas e na operação e expansão de linhas já existentes, tais campos devem ser analisados e calculados para que respeitem as normas que regulamentam seus limites. Tais limites são impostos pois, mesmo em condições normais, eles são prejudiciais à saúde humana, podendo, por exemplo, causar interferência em aparelhos marca-passo (EPRI, 2005).

O interesse e a preocupação com os CEM de FEB aumentou com a publicação de um relatório, por Wertheimer e Leeper (1979), com os resultados de uma investigação epidemiológica, realizada em uma região dos Estados Unidos, que apontava para uma possível associação entre o câncer infantil e a proximidade das casas com linhas de energia.

Em 1996, a Organização Mundial da Saúde (OMS) começou a realizar estudos para investigar os riscos à saúde que os CEM de FEB poderiam causar. As conclusões obtidas foram que os níveis de campos elétricos de FEB, aos quais a população geralmente está sujeita, não causam problemas substanciais à saúde. Quanto aos campos magnéticos de FEB, foi estudada sua associação a várias doenças como câncer, depressão, distúrbios cardiovasculares, modificações imunológicas e doenças neurodegenerativas. No entanto, a conclusão foi de que evidências científicas associando tais campos a essas doenças são muito fracas. Nos casos das doenças cardiovasculares e do câncer de mama, a evidência sugere que esses campos não os causam (OMS, 2007).

Embora os estudos realizados não apresentem relação entre doenças e os CEM de FEB, a OMS estabeleceu alguns limites para a exposição da população ocupacional e geral a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos gerados por estações transmissoras de radiocomunicação, por terminais de usuário e por sistemas de energia elétrica que operam na faixa até 300 GHz. A partir desses limites, em 5 de maio de 2009 o congresso nacional decretou a Lei n° 11.934 e, com base nessa lei, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu em 23 de março de 2010 a resolução normativa n° 398, regulamentando os limites à exposição humana a CEM originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, na frequência de 60 Hz. Em 1 de julho de 2010, a resolução n° 616 alterou a resolução n° 398, incluindo limites para campos na frequência de 50 Hz. Esses limites estão apresentados na Tabela 1.1.

Segundo a resolução, população ocupacional compreende a população adulta exposta a CEM em condições conhecidas, em função da sua atividade ocupacional, e que é treinada para ser consciente do potencial risco e tomar as precauções apropriadas, enquanto público

Tabela 1.1 – Níveis de referência para CEM nas frequências de 50 e 60 Hz.

|                              | Instalações em 50 Hz  |                            | Instalações em 60 Hz  |                            |
|------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
|                              | Campo Elétrico (kV/m) | Campo Magnético ( $\mu$ T) | Campo Elétrico (kV/m) | Campo Magnético ( $\mu$ T) |
| <b>Público em Geral</b>      | 5,00                  | 200,00                     | 4,17                  | 200,00                     |
| <b>População Ocupacional</b> | 10,00                 | 1000,00                    | 8,33                  | 1000,00                    |

em geral compreende indivíduos de todas as idades e diferentes estados de saúde não integrantes da população ocupacional.

Diante das problemáticas apresentadas, faz-se necessário o cálculo dos CEM em projetos de LTs para que todas as normas sejam respeitadas. Além de atender às normas, é de interesse analisar e compreender como variam e se distribuem esses campos, no sentido de eventualmente otimizar tal projeto.

## 1.4 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um *software* baseado em MATLAB® que realize o cálculo dos campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão de energia, apresentando resultados em gráficos de duas e três dimensões. Como objetivos específicos, tem-se: resumir formulações utilizadas para o cálculo dos CEM apresentadas em literaturas técnicas; utilizar a ferramenta de criação de *softwares* do MATLAB® para desenvolver o que se propõe; validar o trabalho através de estudos de caso, comparando os resultados obtidos com os resultados apresentados em relatórios de estudos de LTs reais.

## 1.5 Organização

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução sobre o sistema elétrico de potência, como também as motivações, delimitações e objetivos do trabalho. No capítulo dois é feita uma fundamentação teórica sobre os métodos existentes para o cálculo dos CEM em LTs, apresentando posteriormente o equacionamento matemático do método escolhido e do comportamento mecânico dos condutores em LTs. No terceiro capítulo as coordenadas de um sistema de transmissão são descritas e a implementação do trabalho é apresentada, bem como sua forma de funcionamento. No capítulo quatro, os estudos de caso e as análises do *software* proposto são realizados. Por fim, no quinto capítulo são trazidas as conclusões do trabalho, como também propostas para trabalhos futuros.





## 2 Fundamentação Teórica

Este capítulo está dividido em quatro seções. Primeiramente, uma breve descrição sobre os métodos existentes para o cálculo de campos elétricos e magnéticos é apresentada, apontando o método utilizado neste trabalho. Posteriormente, nas Seções 2.2 e 2.3, apresenta-se como realizar o cálculo destes campos. Em seguida, é apresentada uma breve explicação da influência do aumento de número de circuitos em uma LT nos cálculos dos CEM. Na seção final descreve-se como calcular a catenária descrita pelos condutores em um sistema de transmissão.

### 2.1 Método Utilizado

As linhas de transmissão de energia inserem, sobre o ambiente próximo por onde elas passam, campos elétricos e magnéticos, devido à tensão aplicada na linha e às correntes que circulam nos cabos. É necessário, então, calcular as intensidades destes campos e ajustar o projeto da LT para que respeitem as normas, visando reduzir os efeitos e incômodos sobre o meio ambiente e os seres vivos que circundam a região por onde a linha passa.

Para o cálculo dos CEM os três métodos mais utilizados são (ABDEL-SALAM; EL-MOHANDES, 1989):

- Método das Diferenças Finitas (MDF);
- Método dos Elementos Finitos (MEF);
- Método de Simulação de Cargas (MSC).

Para o uso do MDF e do MEF, a região na qual os campos serão calculados deve ser limitada por fronteiras, cujos potenciais elétricos devem ser conhecidos previamente. No entanto, nem sempre esses dados são facilmente obtidos, levando diversas referências no estado da arte ao uso do MSC (WANG et al., 2016; DEIN, 2014; HABIB et al., 2014).

O MSC foi proposto por Singer, Steinbigler e Weiss (1974) como um método numérico, em que as cargas superficiais nos condutores são representadas, computacionalmente, por cargas lineares fictícias localizadas no centro do condutor, sem perder, com isso, a precisão nos resultados. Para a realização dos cálculos as informações necessárias são as dimensões da torre utilizada e a tensão e corrente da linha. Tais dados podem ser facilmente obtidos por meio de medições, bem como nos projetos das LTs.

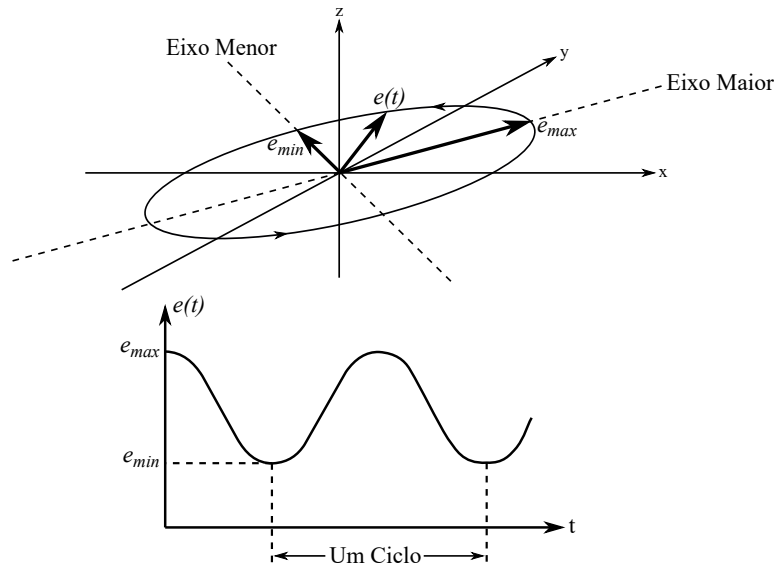
Foi adotado o MSC nos cálculos a serem realizados neste trabalho e será apresentada com mais detalhes, nas seções a seguir, a forma de utilização do método.

## 2.2 Campo Elétrico

Pode-se descrever os CEM gerados por uma LT através de vetores e fasores. Um vetor é caracterizado por uma amplitude e um ângulo no espaço, enquanto um fasor é uma representação de uma função senoidal, caracterizado por uma amplitude e um ângulo de fase.

Para uma LT operando com corrente alternada (CA) senoidal, a amplitude do campo elétrico gerado por essa LT varia ciclicamente na mesma frequência da tensão transmitida. Em um sistema trifásico, o vetor  $\vec{e}$  do campo elétrico gerado varia sua amplitude e direção com o tempo, descrevendo uma elipse, como apresentado na Figura 2.1 (EPRI, 2005).

Figura 2.1 – Elipse do campo elétrico e variação deste com o tempo.



Fonte: Adaptada de EPRI (2005).

Com isso, pode-se descrever o campo elétrico como um vetor dependente do tempo definido por suas componentes espaciais ao longo de três eixos ortogonais:

$$\vec{e}(t) = e_x(t) \cdot \vec{u}_x + e_y(t) \cdot \vec{u}_y + e_z(t) \cdot \vec{u}_z \quad (2.1)$$

onde  $\vec{u}_x$ ,  $\vec{u}_y$  e  $\vec{u}_z$  são vetores unitários nas direções dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.

A funções  $e_x(t)$ ,  $e_y(t)$  e  $e_z(t)$  são periódicas no tempo e podem ser escritas como:

$$e_x(t) = \sqrt{2} \cdot E_x \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha_x) \quad (2.2)$$

$$e_y(t) = \sqrt{2} \cdot E_y \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha_y) \quad (2.3)$$

$$e_z(t) = \sqrt{2} \cdot E_z \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha_z) \quad (2.4)$$

em que  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$  são os valores eficazes do campo elétrico na direção de cada eixo,  $\omega = 2\pi f$ , sendo  $f$  a frequência, e  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  e  $\alpha_z$  são os ângulos de fase que as componentes do campo elétrico formam com seus respectivos eixos.

O valor eficaz total do campo elétrico é dado por:

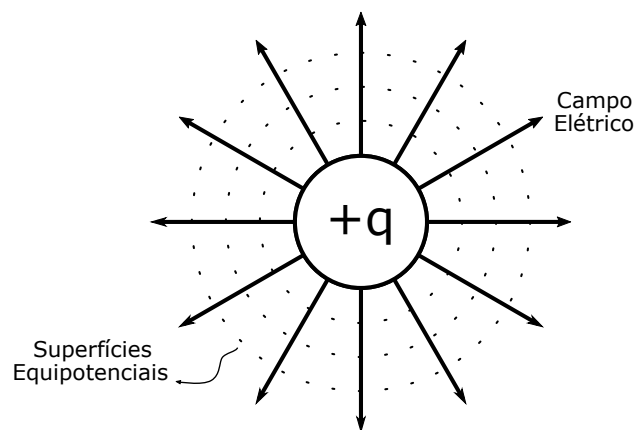
$$E_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int [e(t)]^2 dt} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (2.5)$$

sendo  $T$  o período da função, por exemplo  $\frac{1}{60}$  s para um campo de 60 Hz.

Para os cálculos de campo elétrico realizados neste trabalho, assume-se que o ponto de medição está a uma certa distância da LT. O cálculo do campo elétrico na superfície do condutor necessita de formulações diferentes das que serão apresentadas. Além disso, assume-se que a estrutura da torre não influencia no cálculo dos CEM e que a LT é um conjunto de condutores paralelos entre si, que descrevem uma catenária em relação ao solo, que neste caso é considerado como sendo um plano condutor de extensão infinita. O meio dielétrico entre os condutores e o solo é o ar, cuja permissividade é praticamente independente das condições climáticas e é igual à permissividade do vácuo,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m (EPRI, 2005).

A carga elétrica de um condutor cilíndrico, retilíneo, longo e isolado do solo e de outros condutores carregados, distribui-se uniformemente sobre a sua superfície, formando ao seu redor um campo elétrico homogêneo, cujas superfícies equipotenciais são também cilíndricas e concêntricas com o condutor, como apresentado na Figura 2.2 (FUCHS, 1977).

Figura 2.2 – Campo elétrico e superfícies equipotenciais em um condutor.

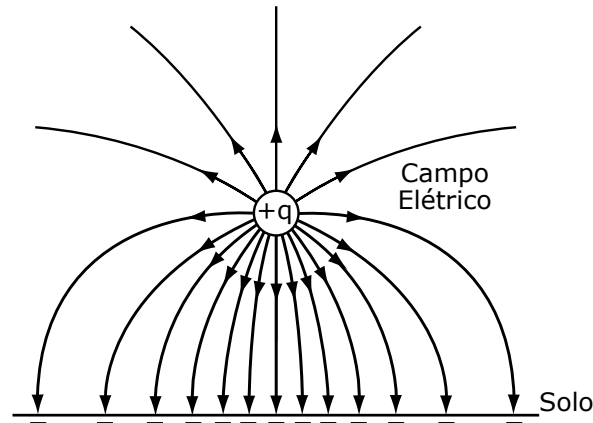


Fonte: Elaborada pelo autor.

O solo terrestre é condutor de eletricidade. Como os condutores das LTs encontram-se suspensos a uma altura finita deste, o campo elétrico gerado pela linha é influenciado por ele, fazendo com que o campo deixe de ser uniforme ao redor do condutor, como

apresentado na Figura 2.3. Com isso, as superfícies equipotenciais nas proximidades da LT também deixam de ser uniformes e uma carga  $-q$  é distribuída sobre o solo, onde terminam as linhas de campo que emanam da superfície do condutor.

Figura 2.3 – Campo elétrico de um condutor suspenso sobre o solo.



Fonte: Adaptada de EPRI (2005).

Fazendo uso do MSC, considera-se as cargas distribuídas na superfície do condutor como uma carga concentrada no centro do mesmo e utiliza-se o método das imagens, em que as cargas na superfície do solo são simuladas por cargas imagens. Estas cargas são assumidas como estando abaixo do solo, como se o solo fosse um espelho refletindo os condutores, e são iguais em amplitude, mas com polaridade oposta em relação às cargas nos condutores. Dessa forma, o solo se torna um plano com potencial zero, sendo chamado de plano terra. O método está representado na Figura 2.4.

Esse sistema de cargas gera campos elétricos no espaço entre os condutores e o solo que são iguais aos gerados pelas cargas reais distribuídas na superfície dos condutores (EPRI, 2005). O valor do campo elétrico em um certo ponto do espaço pode ser calculado a partir das cargas do condutor, que são calculadas através da tensão transmitida pela LT e da disposição geométrica dos condutores. Com esses dados, pode-se calcular a seguinte equação matricial:

$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad (2.6)$$

onde:

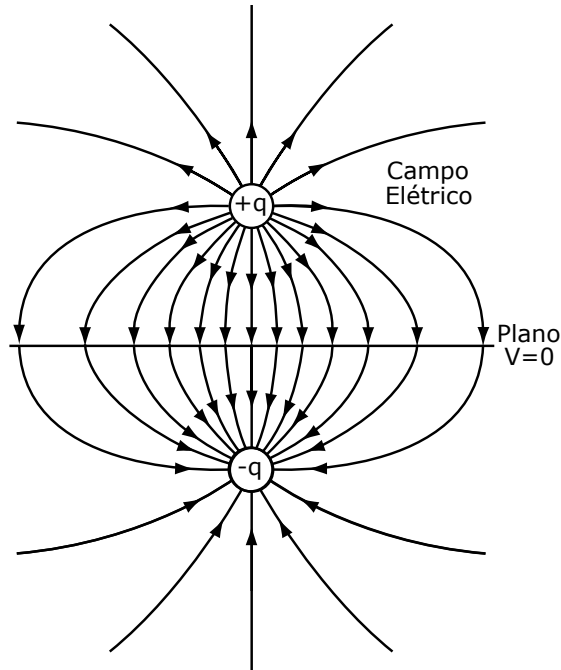
$[Q]$  é o vetor de cargas, dado em C/m;

$[P]$  é a matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell, dado em m/F;

$[V]$  é o vetor das tensões nos condutores, dado em V.

O caso de dois condutores em paralelo é apresentado na Figura 2.5, mas a alturas diferentes do solo, sendo  $H_i$  a altura do condutor  $i$  e  $H_j$  a altura do condutor  $j$ .  $D_{ij}$  é

Figura 2.4 – Método das imagens.



Fonte: Adaptada de EPRI (2005).

a distância entre os dois condutores e  $D'_{ij}$  é a distância entre o condutor  $i$  e a imagem, abaixo do solo, do condutor  $j$ .

Sendo  $r_i$  o raio do condutor  $i$ , pode-se calcular os coeficientes de potencial da seguinte forma (EPRI, 2005):

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left( \frac{2H_i}{r_i} \right) \quad (2.7)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left( \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (2.8)$$

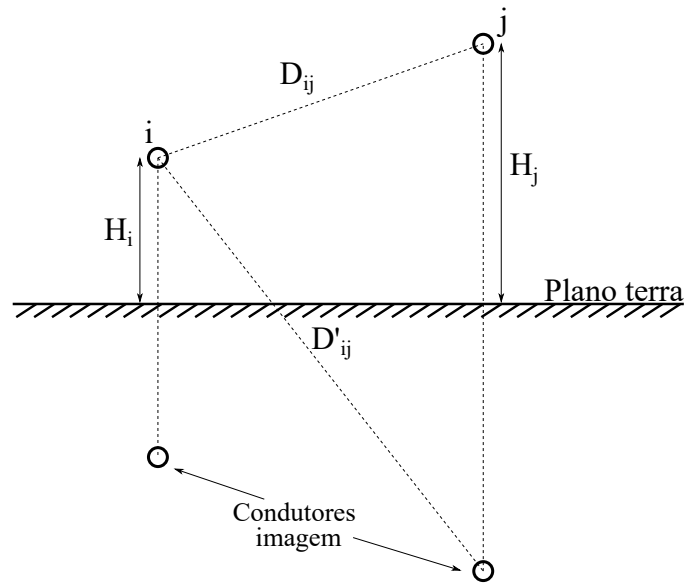
tal que  $P_{ij} = P_{ji}$ , o que torna a matriz  $[P]$  simétrica.

É comum a utilização de mais de um condutor por fase em linhas de transmissão, sendo o conjunto de condutores de uma mesma fase chamado de feixe. Para LTs com esse perfil, ao invés de se calcular o coeficiente de potencial para cada condutor, considera-se o feixe como sendo um único condutor. Nesse condutor equivalente está concentrada toda a carga do feixe. Assim, na Equação (2.7) não se utiliza  $r_i$ , mas sim o raio do condutor equivalente, que é dado pela média geométrica das distâncias entre os condutores do feixe.

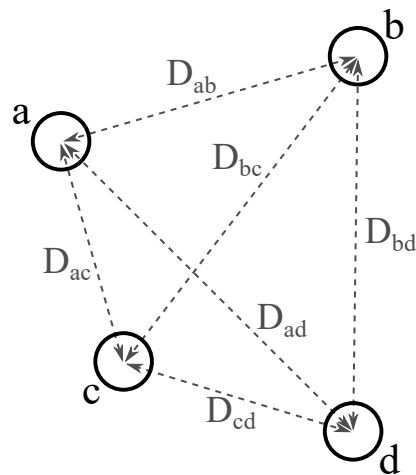
Para uma fase  $i$  com 4 condutores a, b, c e d, de raios  $r_a$ ,  $r_b$ ,  $r_c$  e  $r_d$ , respectivamente, dispostos como apresentado na Figura 2.6, calcula-se o raio do condutor equivalente da seguinte forma:

$$r_{eqi} = \sqrt[16]{r_a D_{ab} D_{ac} D_{ad} D_{ba} r_b D_{bc} D_{bd} D_{ca} D_{cb} r_c D_{cd} D_{da} D_{db} D_{dc} r_d} \quad (2.9)$$

Figura 2.5 – Condutores e suas imagens.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2.6 – Conjunto de condutores de uma fase  $i$  hipotética.

Fonte: Elaborada pelo autor.

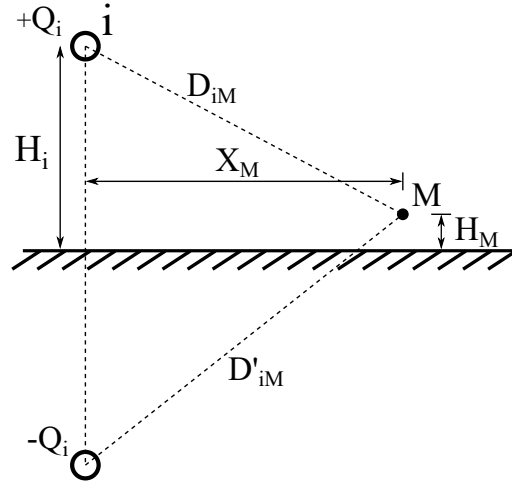
Além disso, as distâncias  $D_{ij}$  e  $D'_{ij}$  são dadas pela média geométrica das distâncias entre cada condutor da fase  $i$  e cada condutor da fase  $j$  ou da imagem de  $j$ .

De posse de todos esses valores, utilizando a Equação (2.6), tem-se as cargas de cada fase no vetor  $[Q]$ .

Analisando uma LT com fases  $i$ ,  $j$  e  $k$ , para calcular o campo elétrico em um dado ponto no espaço, deve-se encontrar a contribuição de cada fase para a existência desse

campo. Verificando a contribuição da fase  $i$ , tem-se a situação apresentada na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Cálculo do campo elétrico em um ponto  $M$  no espaço.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Calculando o campo elétrico exercido pela fase  $i$  no ponto  $M$ , nos eixos  $x$  e  $y$ , ou seja, as componentes horizontal e vertical, tem-se (EPRI, 2005):

$$E_{ix} = \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ \frac{X_M}{X_M^2 + (H_i - H_M)^2} - \frac{X_M}{X_M^2 + (H_i + H_M)^2} \right] \quad (2.10)$$

$$E_{iy} = \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ \frac{H_M - H_i}{X_M^2 + (H_i - H_M)^2} - \frac{H_M + H_i}{X_M^2 + (H_i + H_M)^2} \right] \quad (2.11)$$

Para as outras fases o cálculo segue o mesmo formato. Somando as contribuições de todas as fases pode-se calcular o campo elétrico eficaz no ponto  $M$ , dado por:

$$E_x = E_{ix} + E_{jx} + E_{kx} \quad (2.12)$$

$$E_y = E_{iy} + E_{jy} + E_{ky} \quad (2.13)$$

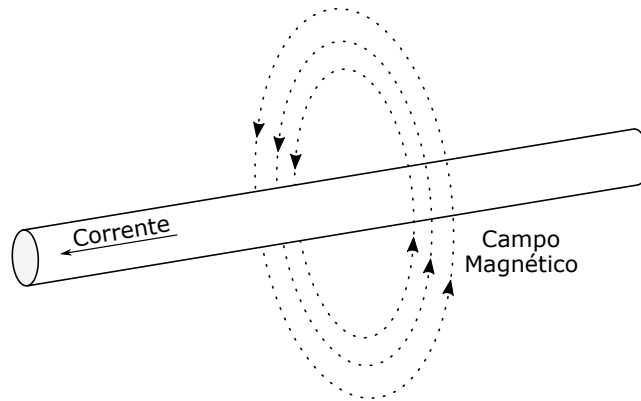
$$E_{efM} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (2.14)$$

## 2.3 Campo Magnético

O campo magnético pode ser definido como uma força, com amplitude e direção, exercida sobre uma carga elétrica em movimento. Se uma carga elétrica se movimenta através de um campo magnético ou se um campo magnético é movimentado sobre uma carga elétrica, a carga estará sujeita a essa força (EPRI, 2005).

Um condutor cilíndrico, retilíneo, de comprimento infinito e isolado do solo e de outros condutores, quando percorrido por uma corrente elétrica produz um campo

Figura 2.8 – Campo magnético em torno de um condutor cilíndrico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

magnético concêntrico com o condutor, como apresentado na Figura 2.8 (FUCHS, 1977). A intensidade do campo é proporcional à intensidade da corrente.

A lei de Ampère relaciona o campo magnético em um percurso fechado com a corrente elétrica que atravessa esse percurso. Isto é, a integral de contorno do campo magnético  $B$  em um dado percurso é igual à corrente  $I$  que atravessa esse percurso multiplicada pela permeabilidade magnética do vácuo  $\mu_0$ . Essa relação está apresentada na Equação (2.15).

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \cdot I \quad (2.15)$$

Tomando como referência a Figura 2.8, pode-se adotar como contorno um dos caminhos concêntricos percorridos pelo campo magnético. Como esse caminho é um círculo, o comprimento é dado por  $2\pi R$ , tal que  $R$  é a distância entre o centro do condutor e o contorno escolhido, ou seja, o raio. O campo  $B$  é dado em tesla (T) ou em gauss (G), sendo  $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ . Já a permeabilidade do vácuo é igual a  $4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$ . Portanto:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi R} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I}{R} \quad (2.16)$$

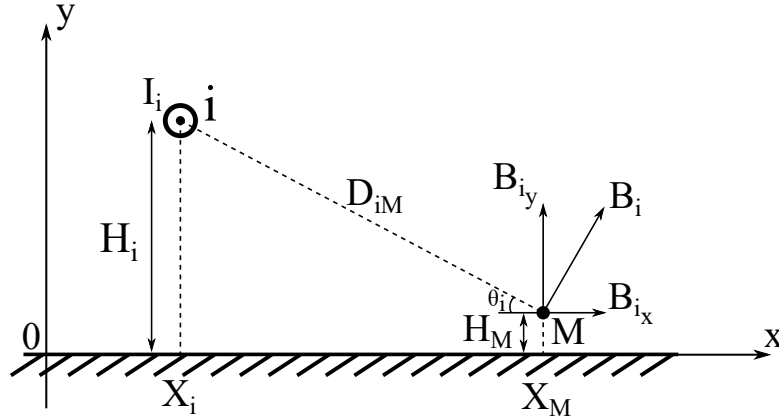
Para os cálculos de campo magnético realizados neste trabalho, assume-se, assim como para os campos elétricos, que o ponto de medição está a uma certa distância da LT. Além disso, assume-se a LT como sendo um conjunto de condutores paralelos entre si, que descrevem uma catenária em relação ao solo. Como o solo é um mal condutor de campos magnéticos, pode-se desconsiderar os condutores imagem sem que haja perda de precisão nos cálculos (EPRI, 2005).

Analisando uma LT com fases  $i$ ,  $j$  e  $k$ , para calcular-se o campo magnético em um dado ponto no espaço, deve-se encontrar a contribuição de cada fase para a existência



desse campo. Verificando a contribuição da fase  $i$ , tem-se a situação apresentada na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Cálculo do campo magnético em um ponto M no espaço.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A fase  $i$  conduz a corrente  $I_i$ , que pode ser expressa pela soma das suas componentes real e imaginária:

$$I_i = \Re\{I_i\} + j \cdot \Im\{I_i\} \quad (2.17)$$

O campo magnético  $B_i$  produzido pela corrente  $I_i$  também possui componentes real e imaginária, sendo a componente real originada por  $\Re\{I_i\}$  e a componente imaginária originada por  $\Im\{I_i\}$ .

Aplicando a Equação (2.16) para o caso da Figura 2.9, tem-se:

$$\Re\{B_i\} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\Re\{I_i\}}{D_{iM}} \quad (2.18)$$

$$\Im\{B_i\} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\Im\{I_i\}}{D_{iM}} \quad (2.19)$$

Como a maior parte dos campos magnéticos gerados por LTs é de valor menor que 1 T ou 1 G, é mais comum expressar tais campos nas unidades de mG ou  $\mu\text{T}$ , tal que  $1 \text{ mG} = 0,1 \mu\text{T}$  (EPRI, 2005). Assim, escrevendo as componentes real e imaginária do campo  $B_i$  em mG e desenvolvendo a distância  $D_{iM}$ , tem-se:

$$\Re\{B_i\} = 2 \cdot \frac{\Re\{I_i\}}{\sqrt{(X_M - X_i)^2 + (H_M - H_i)^2}} \quad (2.20)$$

$$\Im\{B_i\} = 2 \cdot \frac{\Im\{I_i\}}{\sqrt{(X_M - X_i)^2 + (H_M - H_i)^2}} \quad (2.21)$$

Assim como no cálculo do campo elétrico, deve-se calcular as componentes horizontal e vertical do campo magnético, ou seja, o campo  $B_i$  nos eixos  $x$  e  $y$ . Logo:

$$\Re\{B_{ix}\} = \Re\{B_i\} \cdot \text{sen}(\theta_i) = \frac{2 \cdot \Re\{I_i\} \cdot (X_M - X_i)}{(X_M - X_i)^2 + (H_M - H_i)^2} \quad (2.22)$$

$$\Im\{B_{ix}\} = \Im\{B_i\} \cdot \text{sen}(\theta_i) = \frac{2 \cdot \Im\{I_i\} \cdot (X_M - X_i)}{(X_M - X_i)^2 + (H_M - H_i)^2} \quad (2.23)$$

$$\Re\{B_{iy}\} = \Re\{B_i\} \cdot \text{cos}(\theta_i) = \frac{2 \cdot \Re\{I_i\} \cdot (H_M - H_i)}{(X_M - X_i)^2 + (H_M - H_i)^2} \quad (2.24)$$

$$\Im\{B_{iy}\} = \Im\{B_i\} \cdot \text{cos}(\theta_i) = \frac{2 \cdot \Im\{I_i\} \cdot (H_M - H_i)}{(X_M - X_i)^2 + (H_M - H_i)^2} \quad (2.25)$$

Para as outras fases o cálculo segue o mesmo formato. Somando as contribuições de todas as fases pode-se calcular o campo magnético no ponto  $M$ , dado por (EPRI, 2005):

$$B_x = \sqrt{(\Re\{B_{ix}\} + \Re\{B_{jx}\} + \Re\{B_{kx}\})^2 + (\Im\{B_{ix}\} + \Im\{B_{jx}\} + \Im\{B_{kx}\})^2} \quad (2.26)$$

$$B_y = \sqrt{(\Re\{B_{iy}\} + \Re\{B_{jy}\} + \Re\{B_{ky}\})^2 + (\Im\{B_{iy}\} + \Im\{B_{jy}\} + \Im\{B_{ky}\})^2} \quad (2.27)$$

$$B_M = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (2.28)$$

Se o valor eficaz das correntes for utilizado nos cálculos, o campo da Equação (2.28) será um valor eficaz. Para os casos em que as fases de uma LT possuem mais de um condutor, utiliza-se nas equações um condutor equivalente ao feixe, assim como para o cálculo do campo elétrico apresentado na Seção 2.2.

## 2.4 Linhas de Transmissão com Mais de Um Circuito

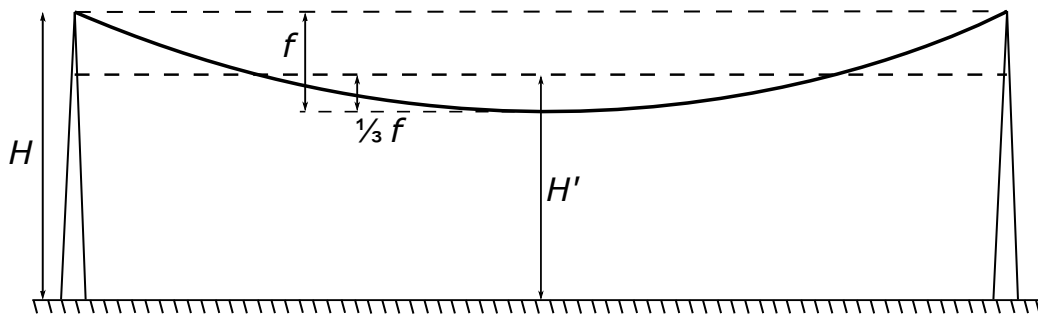
Para LTs que possuem mais de um circuito, os cálculos de CEM não sofrem grande alteração. Em um feixe de condutores a distância entre eles é pequena, fazendo do uso de um condutor equivalente uma simplificação matemática. No entanto, para o caso de linhas de circuito duplo, embora existam duas fases iguais, a distância entre elas é, na maioria dos casos, muito maior que a distância entre os condutores de um feixe. Dessa forma, deve-se considerar a existência de seis fases para que não sejam cometidos erros nos cálculos dos campos (BEGAMUDRE, 2006). Essa conclusão se estende para todos os tipos de LTs.

As Equações (2.7) e (2.8) se mantêm. No entanto, considera-se, no caso de uma LT de circuito duplo, a existência de 6 condutores imagem. Assim, a matriz  $[P]$  torna-se de dimensão 6x6. Com isso,  $[Q]$  se torna um vetor de 6 valores e as Equações (2.12), (2.13), (2.26) e (2.27) passam a considerar 6 termos.

## 2.5 Comportamento Mecânico dos Condutores

Sabe-se que entre duas torres de transmissão os cabos condutores assumem o formato de uma parábola, tal que sua altura sobre o solo varia. Essa forma característica recebe o nome de catenária (FUCHS et al., 1992). Para o cálculo dos CEM, é comum assumir o solo como sendo plano e os condutores paralelos a ele, a uma altura  $H'$ , sem considerar tal variação, como apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Altura dos condutores assumida para os cálculos.



Fonte: Adaptada de Fuchs et al. (1992).

A altura considerada é dada por:

$$H' = H - \frac{2}{3} \cdot f \quad (2.29)$$

tal que:

$H$  é a altura do condutor, sobre o solo, no ponto de suspensão, dada em m;

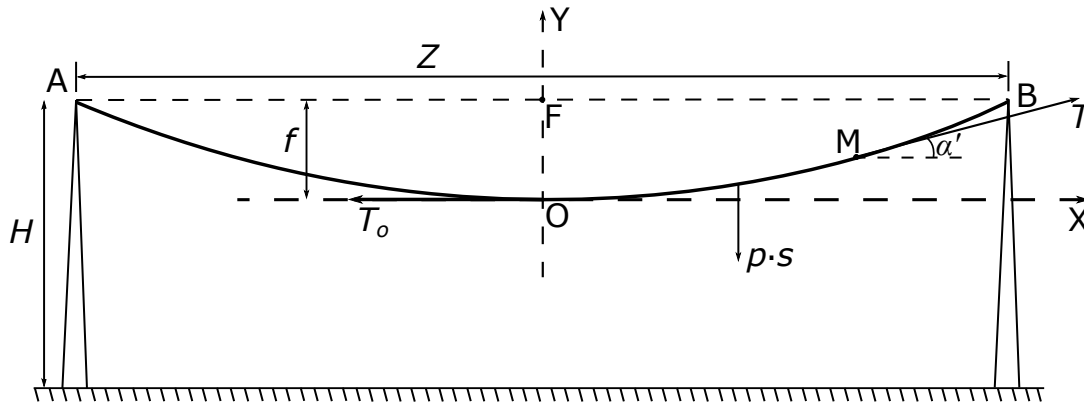
$f$  é a flecha do condutor dada para um vão característico da LT, dada em m.

Para uma maior precisão nos cálculos dos CEM, deve-se considerar a variação da altura dos condutores, mas mantendo a suposição de que o solo é plano e os condutores são suspensos por torres a uma mesma altura.

Sendo assim, considere um condutor suspenso por dois suportes, A e B, de mesma altura e separados entre si por uma distância  $Z$ , como mostrado na Figura 2.11. Num sistema de transmissão de energia, o espaçamento entre duas torres recebe o nome de vão.

A flecha  $f$  depende da temperatura, do vento, do vão e do valor de tração aplicada ao condutor na sua fixação em uma torre (FUCHS et al., 1992). Já a altura do ponto O em relação ao solo, denominada altura de segurança, é estabelecida pela norma técnica NBR 5422 em função da tensão transmitida pela LT e do tipo de terreno pelo qual a linha passa. Como o condutor assume o formato de uma catenária, o comprimento  $L$  do cabo utilizado entre duas torres é maior que o vão entre elas.

Figura 2.11 – Condutor suspenso por dois suportes de mesma altura.



Fonte: Adaptada de Fuchs et al. (1992).

Considere como referência os eixos OX e OY. Limitando-se ao segmento  $OM = s$  da curva, ele estará em equilíbrio quando a soma das forças atuantes sobre ele for nula. Essas forças são: o peso do segmento do condutor  $p \cdot s$ ; a tração no ponto O, dada por  $T_o$ , com direção tangencial à curva no ponto O, ou seja, horizontal; e a tração no ponto M, dada por  $T$ , com direção tangencial ao ponto M, ou seja, formando um ângulo  $\alpha'$  com a direção horizontal. A força  $T$  representa a reação da estrutura às outras forças que atuam no condutor.

Assim, para o equilíbrio no eixo OX, deve-se ter:

$$T \cdot \cos(\alpha') = T_o \quad (2.30)$$

e no eixo OY:

$$T \cdot \sin(\alpha') = p \cdot s \quad (2.31)$$

Dividindo a Equação (2.31) pela (2.30), tem-se:

$$\operatorname{tg}(\alpha') = \frac{p \cdot s}{T_o} \quad (2.32)$$

Considerando um segmento muito pequeno do condutor, pode-se escrever:

$$\operatorname{tg}(\alpha') = \frac{dy}{dx} = K \quad (2.33)$$

tal que

$$K = \frac{p \cdot s}{T_o} \quad (2.34)$$

Sendo o segmento  $ds$  a hipotenusa de um triângulo formado com  $dy$  e  $dx$ , diferenciando a Equação (2.34), tem-se:

$$dK = \frac{p}{T_o} \cdot ds = \frac{p}{T_o} \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (2.35)$$

Da Equação (2.33),  $dy = dx \cdot K$ , assim:

$$\frac{dK}{\sqrt{1+K^2}} = \frac{p}{T_o} \cdot dx \quad (2.36)$$

Integrando a Equação (2.36), encontra-se:

$$\ln(\pm K + \sqrt{1+K^2}) = \pm \frac{p}{T_o} \cdot x \quad (2.37)$$

tal que a constante de integração é nula, pois se  $x = 0$ ,  $K = 0$ . Daí, obtém-se:

$$+K + \sqrt{1+K^2} = e^{+\frac{p}{T_o} \cdot x} \quad (2.38)$$

$$-K + \sqrt{1+K^2} = e^{-\frac{p}{T_o} \cdot x} \quad (2.39)$$

Subtraindo item a item, tem-se:

$$K = \frac{e^{\frac{p}{T_o} \cdot x} - e^{-\frac{p}{T_o} \cdot x}}{2} = \sinh\left(\frac{x}{T_o/p}\right) \quad (2.40)$$

Como  $K = dy/dx$ , integrando a Equação (2.40), encontra-se:

$$y = \frac{T_o}{p} \cdot \cosh\left(\frac{x}{T_o/p}\right) + C \quad (2.41)$$

Para  $y = 0$ ,  $x = 0$  e  $\cosh(0) = 1$ , tem-se  $C = -T_o/p$ , assim:

$$y = \frac{T_o}{p} \cdot \left[ \cosh\left(\frac{x}{T_o/p}\right) - 1 \right] \quad (2.42)$$

Organizando essa equação, tal que  $J = T_o/p$ , tem-se o termo  $\cosh(x/J)$ , que pode ser desenvolvido em série, tal que:

$$\cosh\left(\frac{x}{J}\right) = 1 + \frac{x^2}{2! \cdot J^2} + \frac{x^4}{4! \cdot J^4} + \frac{x^6}{6! \cdot J^6} + \dots + \frac{x^n}{n! \cdot J^n} \quad (2.43)$$

Em LTs reais o valor de  $J$  é sempre de ordem superior a 1000, o que faz com que essa série seja rapidamente convergente (FUCHS et al., 1992). Assim, é suficiente empregar apenas os dois primeiros termos da série. Portanto:

$$y = J \cdot \left[ 1 + \frac{x^2}{2 \cdot J^2} - 1 \right] = \frac{p \cdot x^2}{2 \cdot T_o} \quad (2.44)$$

Para se ter uma equação que dê o valor da flecha para todos os pontos do vão, ou seja, da catenária formada pelo condutor, adota-se  $x = Z/2$  e  $y = f$ . Substituindo na Equação (2.44), encontra-se:

$$f = \frac{p \cdot Z^2}{8 \cdot T_o} \quad (2.45)$$

Em LTs reais:  $p$  é o peso nominal do condutor utilizado, dado pelo fabricante em kg/km;  $Z$  é o vão característico do projeto das LTs, ou seja, a distância padrão entre uma torre e outra; e  $T_o$  é a carga de ruptura do cabo utilizada no projeto das LTs, isto é, quão alongado está o condutor entre as torres, dado em kgf. Tem-se, através da Equação (2.45) que quanto maior a carga de ruptura utilizada, menor a catenária da LT, ou seja, mais reto estará o condutor entre uma torre e outra.

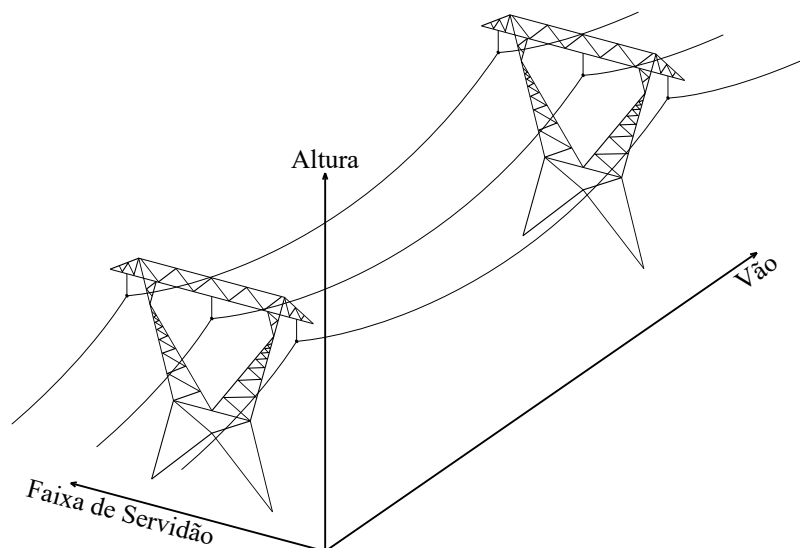
## 3 Implementação

Após a descrição matemática apresentada no Capítulo 2, a implementação de algoritmos, descritos na forma de scripts, elaborados em ambiente MATLAB® é o objetivo principal deste capítulo. Na primeira seção os eixos de um sistema de transmissão são descritos e as formas de como apresentar gráficos tridimensionais nos cálculos de CEM são apresentadas. Na última seção a interface do *software* proposto é apresentada e sua forma de funcionamento é descrita.

### 3.1 Coordenadas em Sistemas de Transmissão

Em um sistema de transmissão, três eixos são adotados para descrever distâncias: altura, faixa de servidão e vão, como apresentado na Figura 3.1. Altura é o eixo vertical, vão é a distância entre uma torre e outra, e faixa de servidão é a largura de terra necessária para garantir a segurança das instalações da LT e das pessoas que convivem com a linha. Essas três propriedades são especificadas durante o projeto da LT. Embora na prática se tenha diferenças entre os vãos que formam uma LT, os valores especificados pelo projeto da linha para o chamado vão médio podem ser utilizados como referência.

Figura 3.1 – Eixos adotados em um sistema de transmissão.

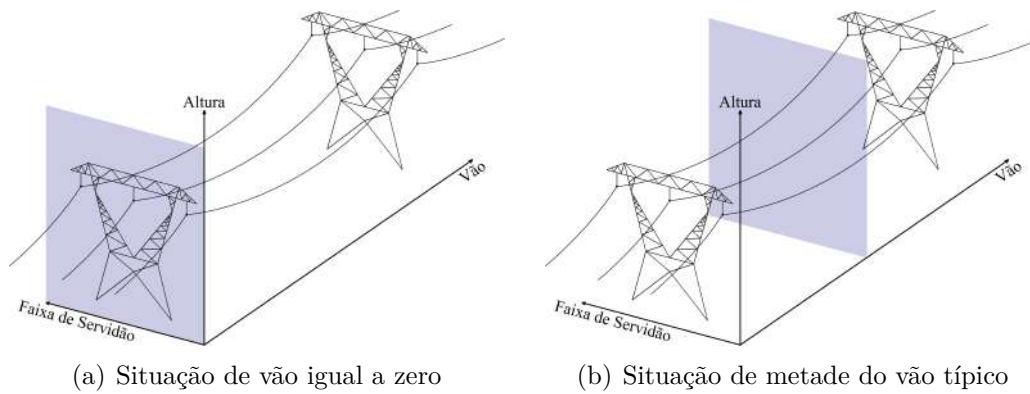


Fonte: Elaborada pelo autor.

No Capítulo 2 foi apresentado o cálculo de CEM em um ponto  $M$  no espaço. Assumindo um valor fixo de vão e altura, e calculando o valor dos campos para cada ponto

da faixa de servidão, tem-se um gráfico bidimensional que apresenta o valor dos campos em função da faixa de servidão, para os valores de vão e altura definidos. Mantendo o valor fixo de vão e realizando o mesmo cálculo para o restante da altura, tem-se um gráfico tridimensional que apresenta o valor dos campos em função da faixa de servidão e da altura, para o valor fixado de vão. Uma representação deste caso está apresentada na Figura 3.2.

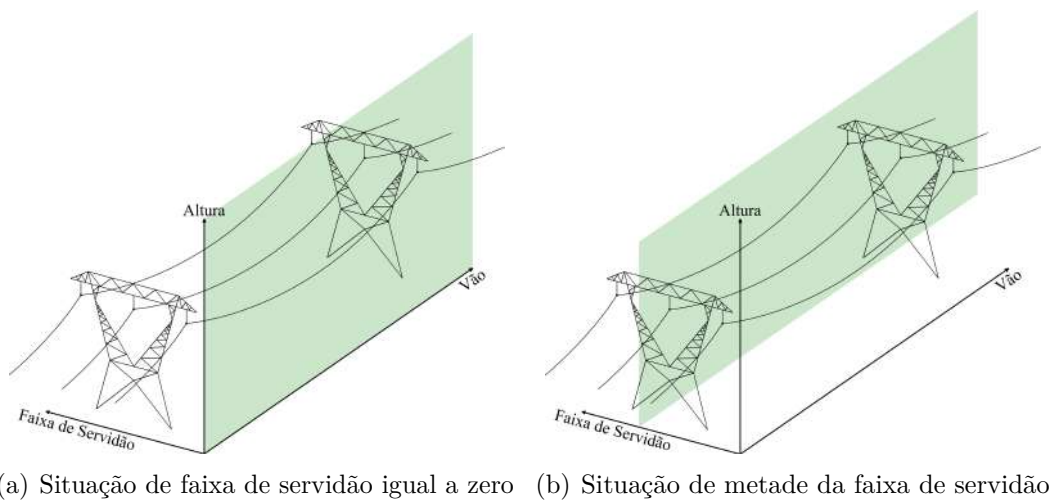
Figura 3.2 – Análise Faixa de servidão x Altura, para diferentes valores de vão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa análise pode ser variada entre os eixos, assim tem-se ainda as situações Vão x Altura e Faixa de servidão x Vão, que estão apresentadas nas Figuras 3.3 e 3.4, nesta ordem.

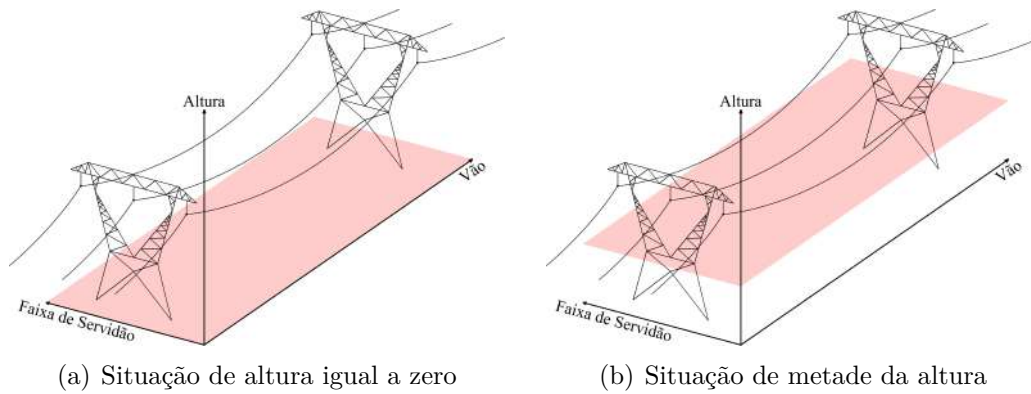
Figura 3.3 – Análise Vão x Altura, para diferentes valores de faixa de servidão.



Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 3.4 – Análise Faixa de servidão x Vão, para diferentes valores de altura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com isso, os CEM calculados podem ser analisados de forma mais rápida do que recorrendo a gráficos bidimensionais.

## 3.2 Implementação do Método

Os cálculos apresentados no Capítulo 2 foram implementados em ambiente MATLAB®. Para a entrada de dados utilizou-se planilhas Excel®, como a apresentada na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Exemplo de planilha Excel® de entrada.

|    | A               | B      | C     | D       | E           | F                   | G                      | H        | I      | J     | K      |
|----|-----------------|--------|-------|---------|-------------|---------------------|------------------------|----------|--------|-------|--------|
|    | Condutor (fase) | x (m)  | y (m) | r (m)   | RMG (m)     | Peso nominal (kg/m) | Carga de ruptura (kgf) | Vfase    | Vfase° | linha | linha° |
| 1  |                 |        |       |         |             |                     |                        |          |        |       |        |
| 2  | 1               | -9,77  | 19,03 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 120    | 2200  | 120    |
| 3  | 1               | -9,77  | 18,57 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 120    | 2200  | 120    |
| 4  | 1               | -10,23 | 19,03 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 120    | 2200  | 120    |
| 5  | 1               | -10,23 | 18,57 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 120    | 2200  | 120    |
| 6  | 2               | 0,23   | 18,43 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 0      | 2200  | 0      |
| 7  | 2               | 0,23   | 17,97 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 0      | 2200  | 0      |
| 8  | 2               | -0,23  | 18,43 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 0      | 2200  | 0      |
| 9  | 2               | -0,23  | 17,97 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 0      | 2200  | 0      |
| 10 | 3               | 10,23  | 19,03 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 240    | 2200  | 240    |
| 11 | 3               | 10,23  | 18,57 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 240    | 2200  | 240    |
| 12 | 3               | 9,77   | 19,03 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 240    | 2200  | 240    |
| 13 | 3               | 9,77   | 18,57 | 0,01089 | 0,008481141 | 0,9764              | 2026,99                | 288675,1 | 240    | 2200  | 240    |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A planilha deve detalhar cada condutor existente na LT. Na coluna A tem-se a descrição da fase do condutor, devendo-se utilizar os números 1, 2 e 3 para cada fase. Para o caso de uma LT de circuito duplo, utiliza-se ainda os números 4, 5 e 6. Não existe

restrição quanto ao uso de um determinado número para uma determinada fase, visto que os ângulos de fase são definidos pelo usuário.

Nas colunas B e C têm-se as coordenadas geométricas de cada condutor considerando o solo como origem do eixo vertical e o eixo central da torre de transmissão como origem do eixo horizontal. Na coluna D tem-se o raio do condutor e na coluna E, o raio médio geométrico, que à princípio não é utilizado, podendo ser útil em trabalhos futuros.

Na coluna F indica-se o peso nominal do condutor, valor presente em catálogos de fabricantes de condutores. Na coluna G tem-se a carga de ruptura típica utilizada no projeto da LT. As colunas H e I são reservadas para a tensão de fase atuante no condutor e seu ângulo de fase, respectivamente. Da mesma forma, as colunas J e K indicam as correntes. O valor indicado na coluna J deve ser a corrente total do feixe e não a corrente em cada condutor.

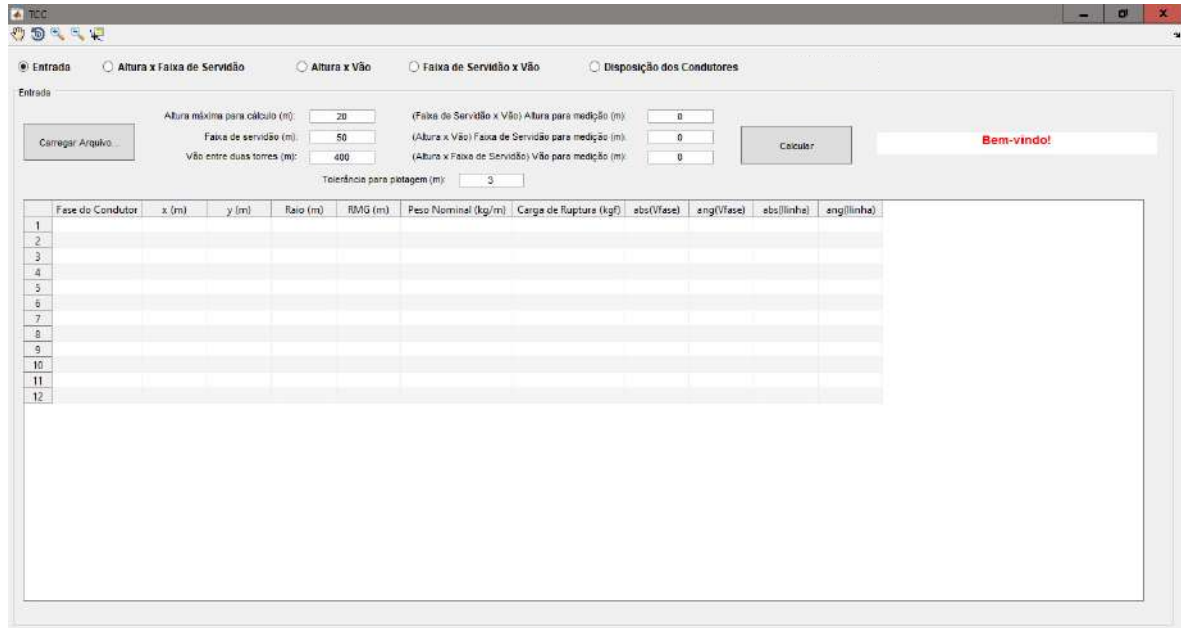
Obtidos os dados de entrada, os campos são calculados. Utilizando os raios dados, calcula-se o raio equivalente de cada feixe, conforme a Equação (2.9). Além disso, com as coordenadas geométricas dos condutores, uma média simples é feita, assumindo o condutor equivalente como estando no centro do feixe, tanto horizontalmente, quanto verticalmente. Com isso, calculam-se os coeficientes da matriz  $[P]$  utilizando as Equações (2.7) e (2.8). Nos cálculos em que o valor do vão varia, a matriz  $[P]$  deve ser recalculada a cada variação, visto que ela depende da altura do condutor em relação ao solo e, como visto na Seção 2.5, esta altura depende do valor do vão.

Utilizando os dados de tensão, tem-se o vetor  $[V]$ , que junto com a matriz  $[P]$  resulta no vetor  $[Q]$ , através da Equação (2.6).

Com os dados de corrente também em mãos, calculam-se os CEM como apresentado nas Seções 2.2 e 2.3.

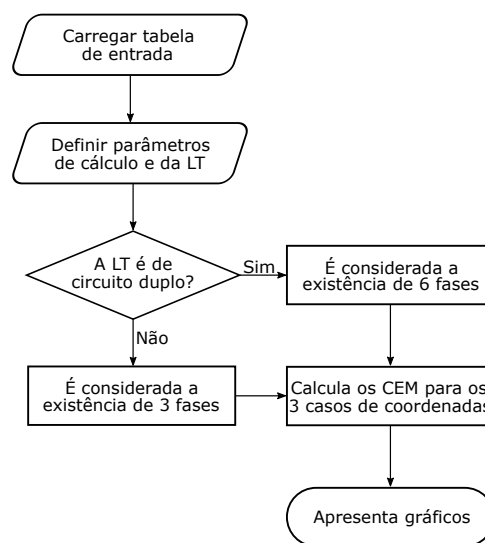
A proposta deste trabalho é a criação de um *software*. Para isso, utilizou-se a ferramenta GUIDE (*Graphical User Interface Design Environment*) disponível no MATLAB®, que é um ambiente de desenvolvimento de aplicativos com interfaces gráficas de interação com o usuário. Com esta ferramenta, a interface inicial foi criada e está apresentada na Figura 3.6.

Tem-se a tecla “Carregar Arquivo...”, para que seja selecionada uma planilha Excel® com os dados de entrada, conforme a Figura 3.5. Esta planilha é exibida na tabela presente no *software*, podendo ser editada dentro do aplicativo. Para os parâmetros de cálculo e da LT, entrada feita diretamente no *software*, deve-se indicar a altura máxima para cálculo, a faixa de servidão e o vão típico do sistema de transmissão. Para cada caso de gráfico tridimensional deve-se indicar qual o valor desejado para o eixo fixo, por exemplo para o cálculo Faixa de servidão x Vão, qual a altura desejada para o cálculo. Além disso, como detalhado no Capítulo 2, os cálculos dos CEM utilizados neste aplicativo são para pontos

Figura 3.6 – Interface inicial do *software* proposto.

Fonte: Elaborada pelo autor.

de medição a uma certa distância da LT. Para isso, também deve ser indicada a tolerância de plotagem (em m), ou seja, a qual distância dos condutores os campos não devem ser calculados. Caso esta entrada seja menor que 2, um aviso de erro é exibido.

Figura 3.7 – Fluxograma de funcionamento do *software* proposto.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após fornecimento dos dados, utiliza-se a tecla “Calcular”. Com isso, todos os

cálculos são realizados, conforme o fluxograma da Figura 3.7, e os gráficos são apresentados nos seus respectivos painéis dentro do *software*.

Nos painéis tem-se os gráficos tridimensionais dos campos, além da possibilidade de visualizar curvas bidimensionais. Com este artifício é possível analisar gráficos como campo elétrico por faixa de servidão, a uma altura de 1 m na metade do vão, gráfico geralmente utilizado em relatórios de estudos que têm como objetivo analisar se os CEM atendem às normas. No painel “Disposição dos Condutores” é apresentada a localização de cada condutor, conforme as coordenadas geométricas dadas na planilha de entrada.

## 4 Resultados

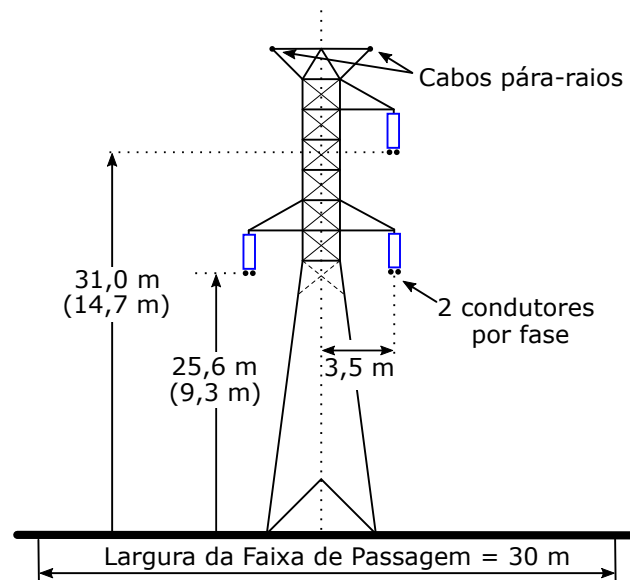
Neste capítulo serão apresentados três estudos de caso para validação do *software* proposto. Todas as LTs estudadas pertencem à Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), com tensão de operação de 230 kV. O primeiro caso é a LT que interliga as subestações Pau Ferro e Santa Rita II. O segundo, a LT que interligará as subestações Jardim e Penedo. A primeira LT foi concluída em 23/03/2017, enquanto a segunda tem conclusão prevista para 01/10/2020 (ANEEL, 2017). O terceiro caso é a LT que interliga as subestações Campina Grande II e Natal II. Na última seção são apresentadas as conclusões do capítulo.

### 4.1 Estudos de Caso

#### 4.1.1 LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II

Os dados desta LT e a disposição geométrica dos condutores na torre, que está apresentada na Figura 4.1, estão apresentados no relatório CHESF (2009b).

Figura 4.1 – LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II.




Fonte: Elaborada pelo autor.

Tem-se 2 condutores por fase, do tipo Flint, espaçados de 0,45 m. Este tipo de condutor apresenta, segundo o catálogo da fabricante Nexans, peso nominal de 1,0299 kg/m e raio de 0,01258 m. A LT apresenta vão típico de 500 m e as distâncias dos condutores

para o solo, nos pontos de flechas máximas, estão dadas entre parênteses na Figura 4.1. Como a catenária descrita pela LT apresenta a maior flecha no meio do vão, aplicando os valores descritos e  $Z = 250$  m na Equação (2.45), obtém-se a carga de ruptura típica utilizada neste projeto, sendo ela 493,625 kgf para todos os condutores.

Para o cálculo dos CEM utiliza-se os valores de carregamento máximo. Para este caso, a tensão máxima operativa é de 242 kV e a corrente máxima é de 1882 A (CHESF, 2009b).

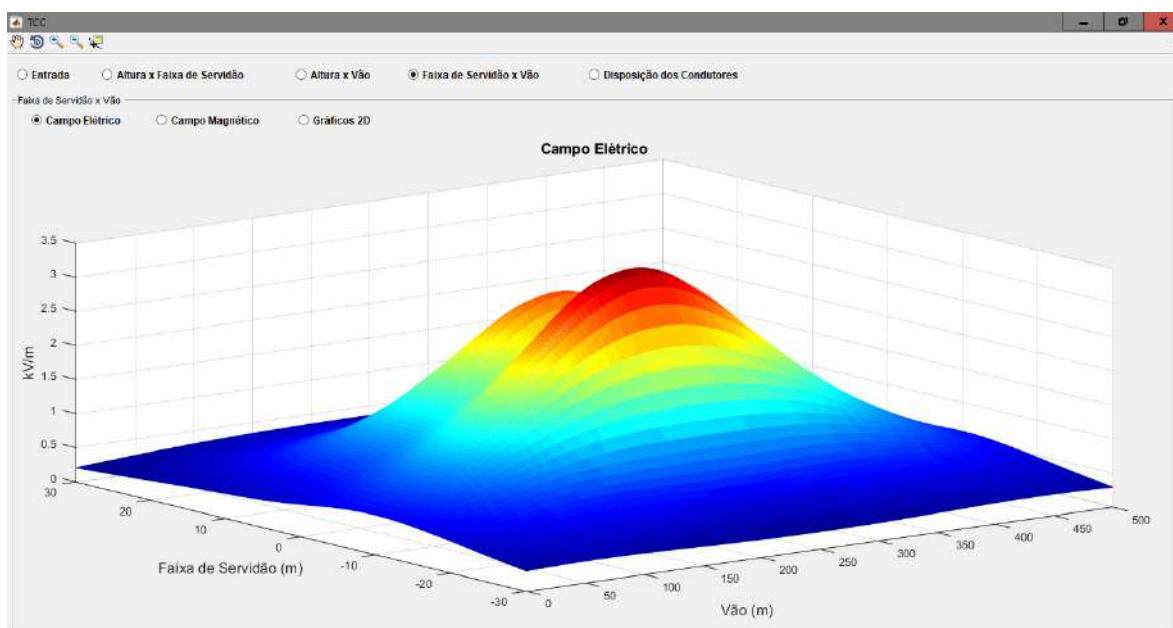
Figura 4.2 – Entrada de dados para a LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II.



| Fase do Condutor | x (m) | y (m)   | Raio (m) | RMG (m) | Peso Nominal (kg/m) | Carga de Ruptura (kgf) | abs(Vfase) | ang(Vfase) | abs(linha) | ang(linha) |
|------------------|-------|---------|----------|---------|---------------------|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 1                | 1     | -3.7250 | 31       | 0.0126  | 0.0098              | 1.0299                 | 493.6250   | 1.3972e+05 | 120        | 1882       |
| 2                | 1     | -3.2750 | 31       | 0.0126  | 0.0098              | 1.0299                 | 493.6250   | 1.3972e+05 | 120        | 1882       |
| 3                | 2     | -3.7250 | 25.6000  | 0.0126  | 0.0098              | 1.0299                 | 493.6250   | 1.3972e+05 | 0          | 1882       |
| 4                | 2     | -3.2750 | 25.6000  | 0.0126  | 0.0098              | 1.0299                 | 493.6250   | 1.3972e+05 | 0          | 1882       |
| 5                | 3     | -3.2750 | 25.6000  | 0.0126  | 0.0098              | 1.0299                 | 493.6250   | 1.3972e+05 | 240        | 1882       |
| 6                | 3     | -3.7250 | 25.6000  | 0.0126  | 0.0098              | 1.0299                 | 493.6250   | 1.3972e+05 | 240        | 1882       |

Fonte: Elaborada pelo autor.

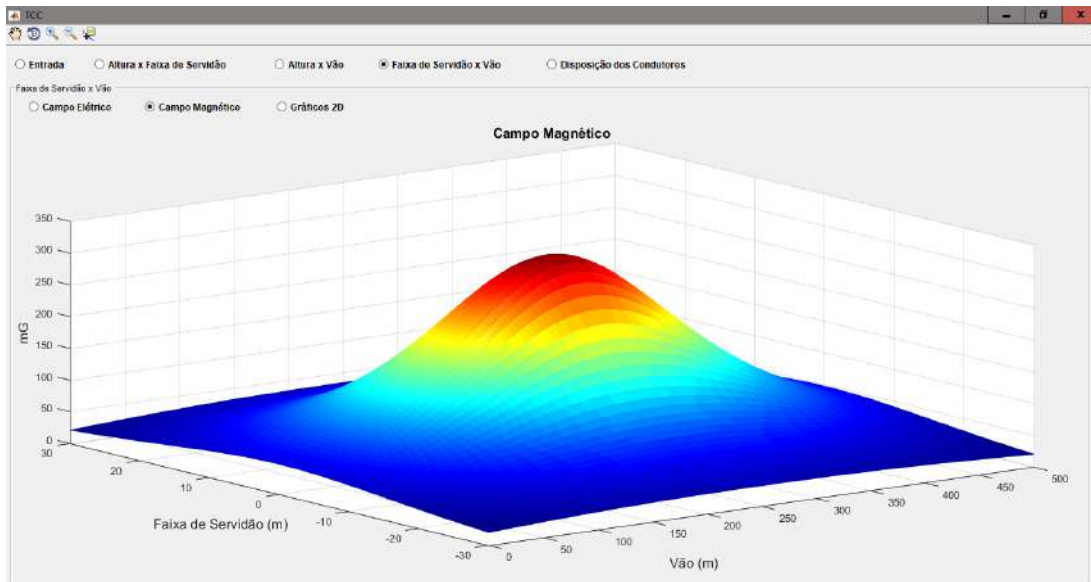
Figura 4.3 – Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo elétrico, para uma altura de 1 m.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com isso, a entrada de dados está apresentada na Figura 4.2 e os resultados estão apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4.

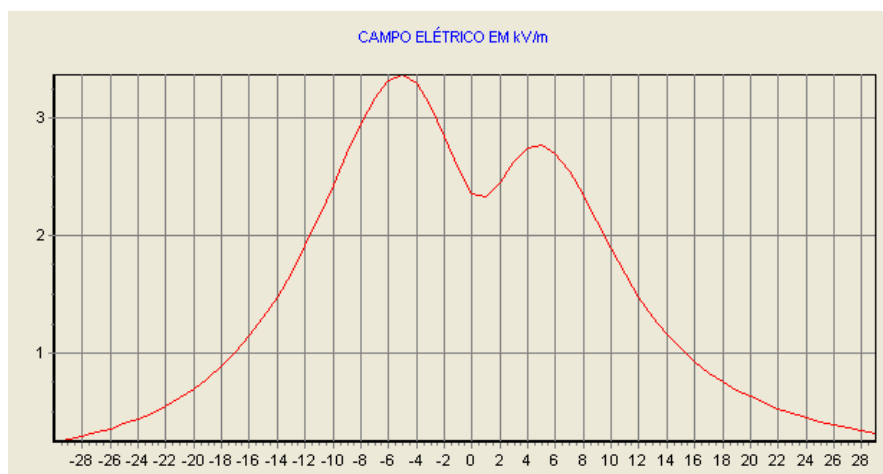
Figura 4.4 – Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo magnético, para uma altura de 1 m.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como os resultados apresentados no relatório CHESF (2009b) são exibidos em gráficos, não se têm dados exatos para comparação. No entanto, comparando graficamente os resultados obtidos pelo *software* com os apontados no relatório, vê-se nas Figuras 4.5 e 4.6 que os campos elétricos encontrados apresentam valores muito próximos.

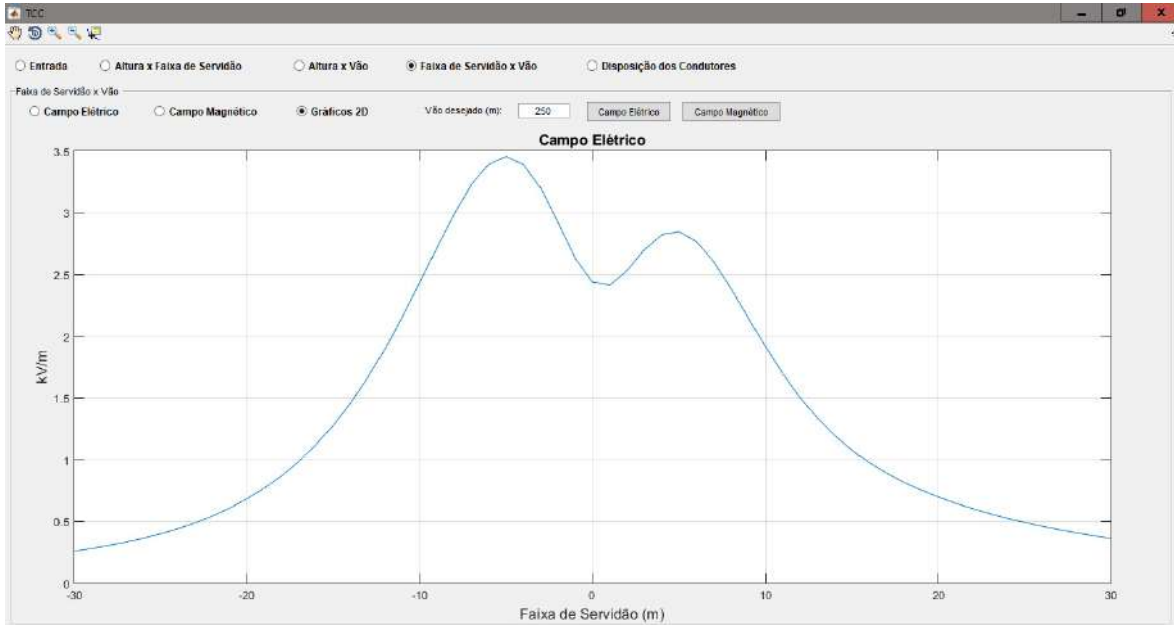
Figura 4.5 – Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão.



Fonte: CHESF (2009b).

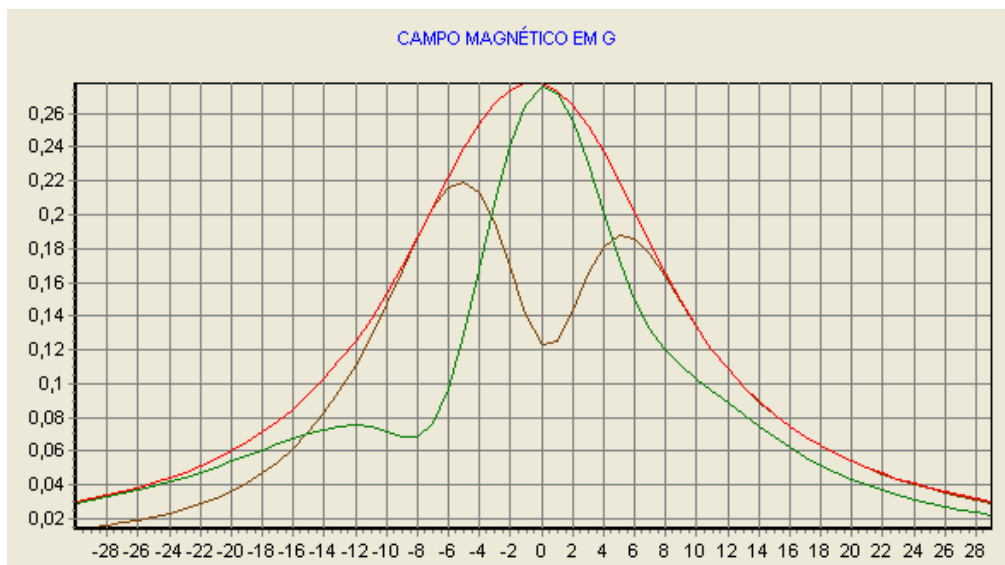
O valor máximo para o campo apresentado no relatório e o valor calculado pelo aplicativo foram de aproximadamente 3,35 kV/m e 3,47 kV/m, respectivamente, o que representa um erro de 3,4%.

Figura 4.6 – Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o *software* proposto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

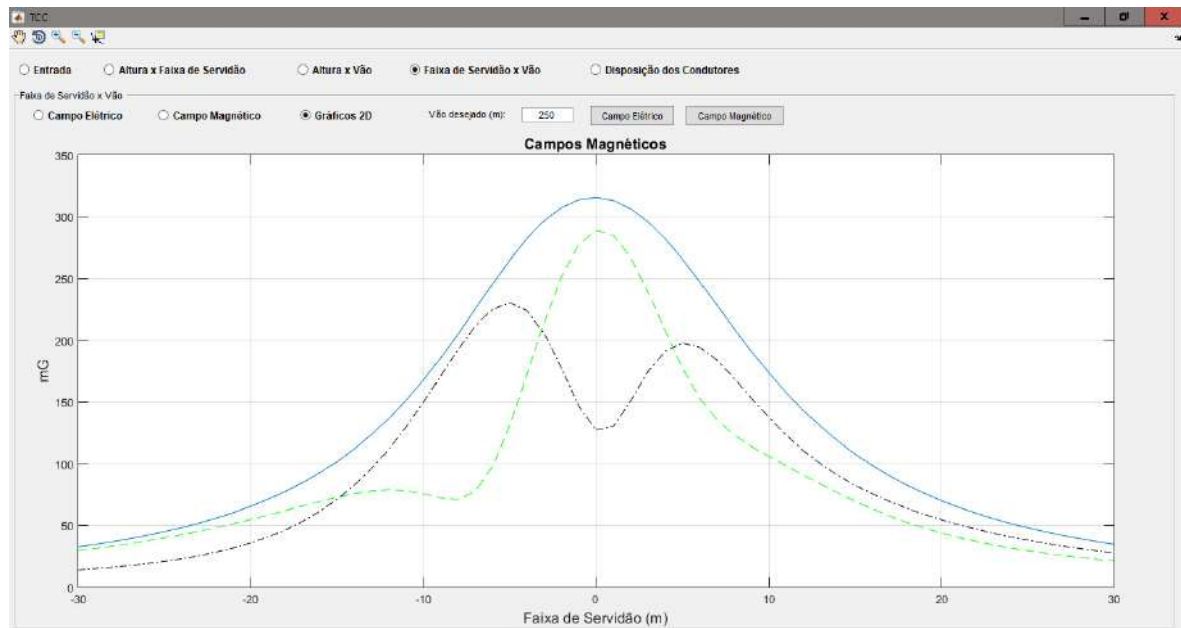
Figura 4.7 – Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão.



Fonte: CHESF (2009b).



Figura 4.8 – Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o *software* proposto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

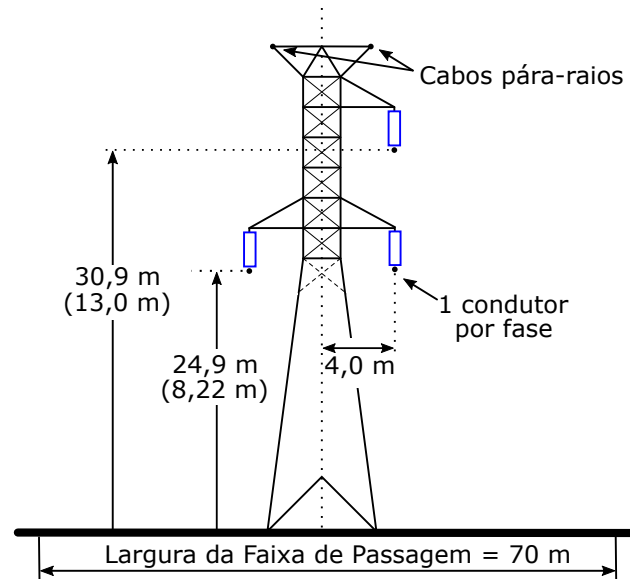
Para o campo magnético segue-se da mesma forma. Graficamente os dois resultados apresentam o mesmo formato, mas o campo calculado através do *software* tem valores um pouco maiores que os apresentados no relatório: 310 mG e 280 mG de valor máximo, respectivamente. Isso representa um erro de 9,7%. Os campos de cor verde e marrom apresentados na Figura 4.7, e de cor verde e preta apresentados na Figura 4.8, são as componentes vertical e horizontal do campo magnético, respectivamente. Assim como nos resultados anteriores, as componentes obtidas com o *software* apresentam mesmo formato e valores muito próximos dos apresentados no relatório da CHESF.

#### 4.1.2 LT 230 kV Jardim - Penedo

Os dados desta LT e a disposição geométrica dos condutores na torre, que está apresentada na Figura 4.9, estão apresentados no relatório CHESF (2008).

Tem-se 1 condutor por fase, do tipo Flint. As características deste tipo de condutor, como apresentado na Subseção 4.1.1, são peso nominal de 1,0299 kg/m e raio de 0,01258 m. A LT apresenta vão típico de 500 m e as distâncias dos condutores para o solo, nos pontos de flechas máximas, estão dadas entre parênteses na Figura 4.9. Como a catenária descrita pela LT apresenta a maior flecha no meio do vão, aplicando os valores descritos e  $Z = 250$  m na Equação (2.45), obtém-se a carga de ruptura típica utilizada neste projeto, sendo ela de 449,502 kgf para o condutor da parte superior e 482,379 kgf para os dois condutores da parte inferior.

Figura 4.9 – LT 230 kV Jardim - Penedo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o cálculo dos CEM utilizam-se os valores de carregamento máximo. Para este caso, a tensão máxima operativa é de 242 kV e a corrente máxima é de 790 A.

Com isso, a entrada de dados está apresentada na Figura 4.10 e nas Figuras 4.11 e 4.12 estão apresentados os resultados.

Figura 4.10 – Entrada de dados para a LT 230 kV Jardim - Penedo.

Interface de entrada de dados para o cálculo de campos elétricos magnéticos (CEM). O software TCC apresenta as seguintes opções e valores:

- Entrada (selecionada)
- Altura x Faixa de Servidão
- Altura x Vão
- Faixa de Servidão x Vão
- Disposição dos Condutores

Entrada:

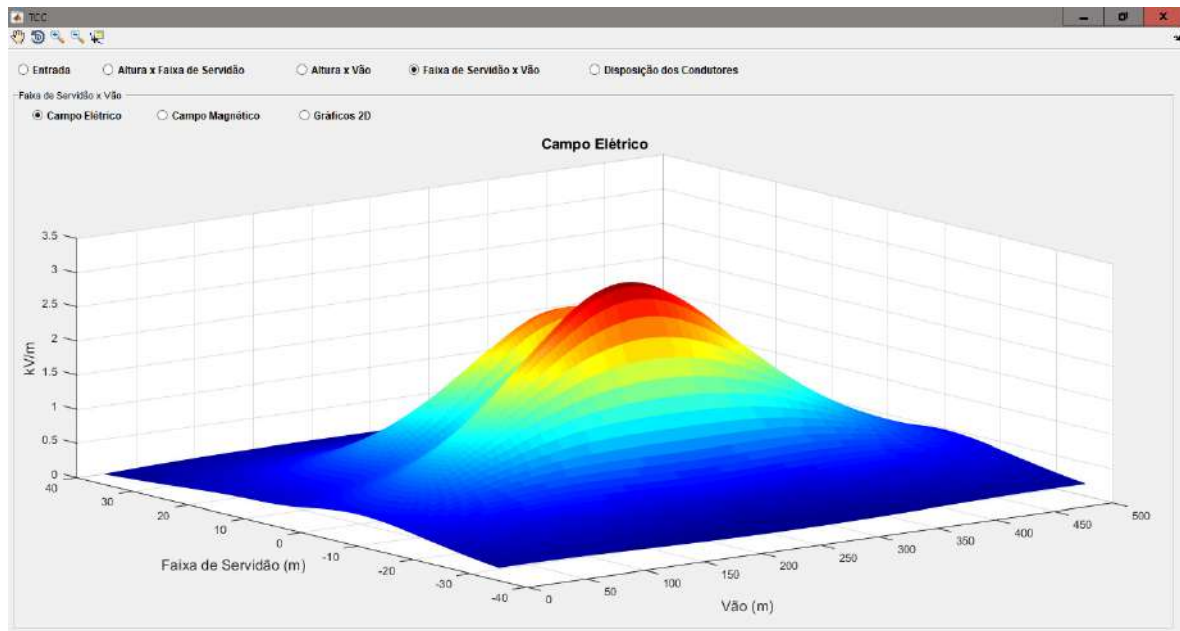
- Carregar Arquivo...
- Altura máxima para cálculo (m): 40
- Faixa de servidão (m): 70
- Vão entre duas torres (m): 500
- (Faixa de Servidão x Vão) Altura para medição (m): 1
- (Altura x Vão) Faixa de Servidão para medição (m): 35
- (Altura x Faixa de Servidão) Vão para medição (m): 250
- Tolerância para plotagem (m): 2
- Calcular

| Fase do Condutor | x (m) | y (m) | Raio (m) | RMG (m) | Peso Nominal (kg/m) | Carga de Ruptura (kgf) | abs(Vfase) | ang(Vfase) | abs(linha) | ang(linha) |     |
|------------------|-------|-------|----------|---------|---------------------|------------------------|------------|------------|------------|------------|-----|
| 1                | 1     | -4    | 30.9000  | 0.0126  | 0.0098              | 1.0299                 | 449.5024   | 1.3972e+05 | 120        | 790        | 120 |
| 2                | 2     | 4     | 24.9000  | 0.0126  | 0.0098              | 1.0299                 | 482.3797   | 1.3972e+05 | 0          | 790        | 0   |
| 3                | 3     | -4    | 24.9000  | 0.0126  | 0.0098              | 1.0299                 | 482.3797   | 1.3972e+05 | 240        | 790        | 240 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

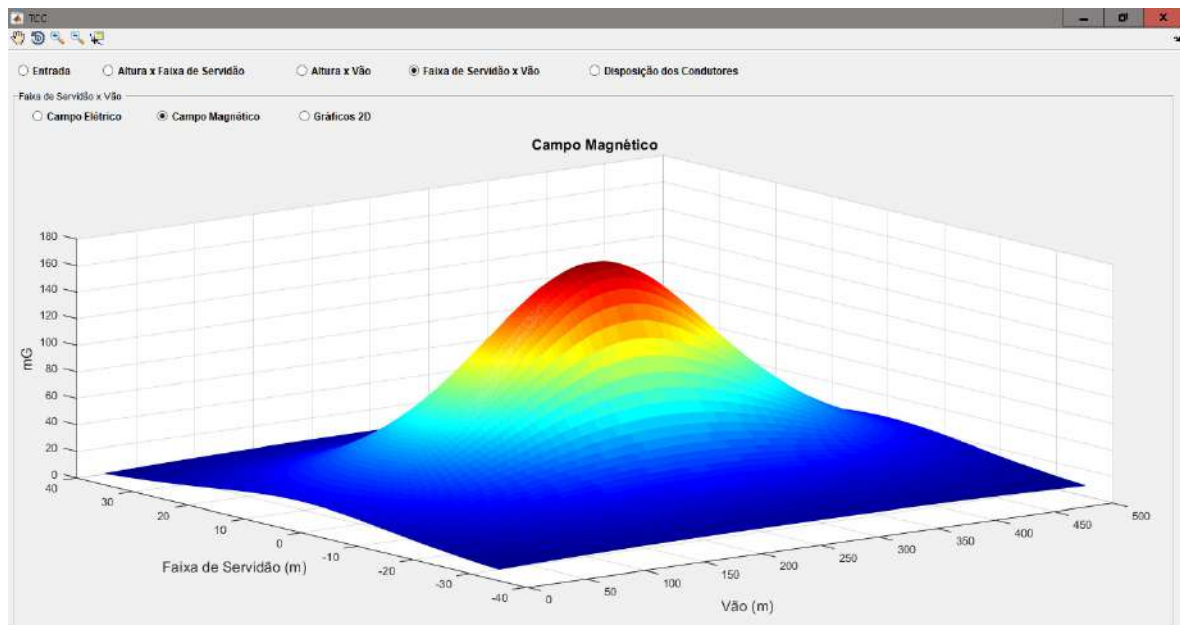
Os resultados apresentados no relatório CHESF (2008) para essa LT também são exibidos em gráficos. Portanto, comparando graficamente os resultados obtidos com os apontados no relatório, vê-se nas Figuras 4.13 e 4.14 que os campos elétricos encontrados apresentam mesmo formato, embora o campo calculado através do aplicativo tenha valores um pouco menores no eixo central, faixa de servidão igual a zero. O valor indicado no

Figura 4.11 – Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo elétrico, para uma altura de 1 m.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.12 – Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo magnético, para uma altura de 1 m.



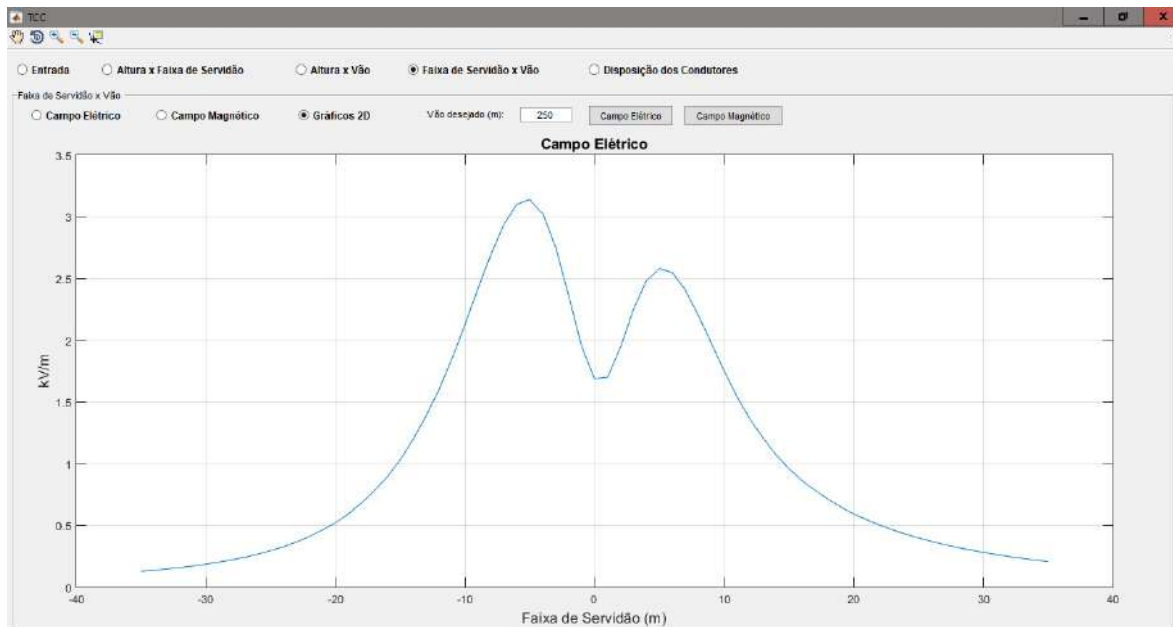
Fonte: Elaborada pelo autor.

relatório é de aproximadamente 1,85 kV/m enquanto o do aplicativo é de 1,71 kV/m, um erro de 7,6%.

Figura 4.13 – Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão.



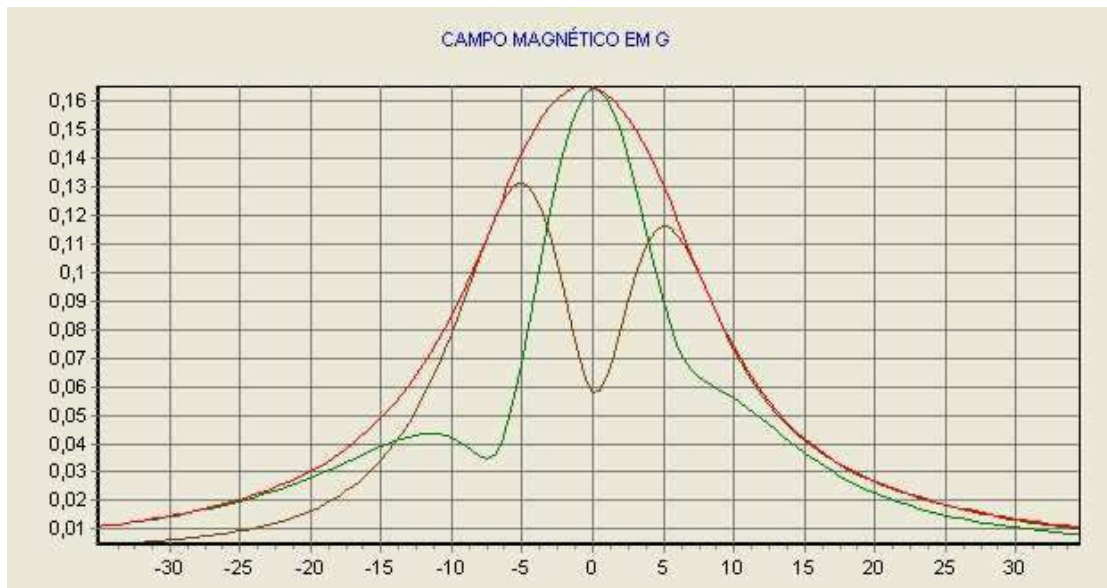
Fonte: CHESF (2008).

Figura 4.14 – Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o *software* proposto.

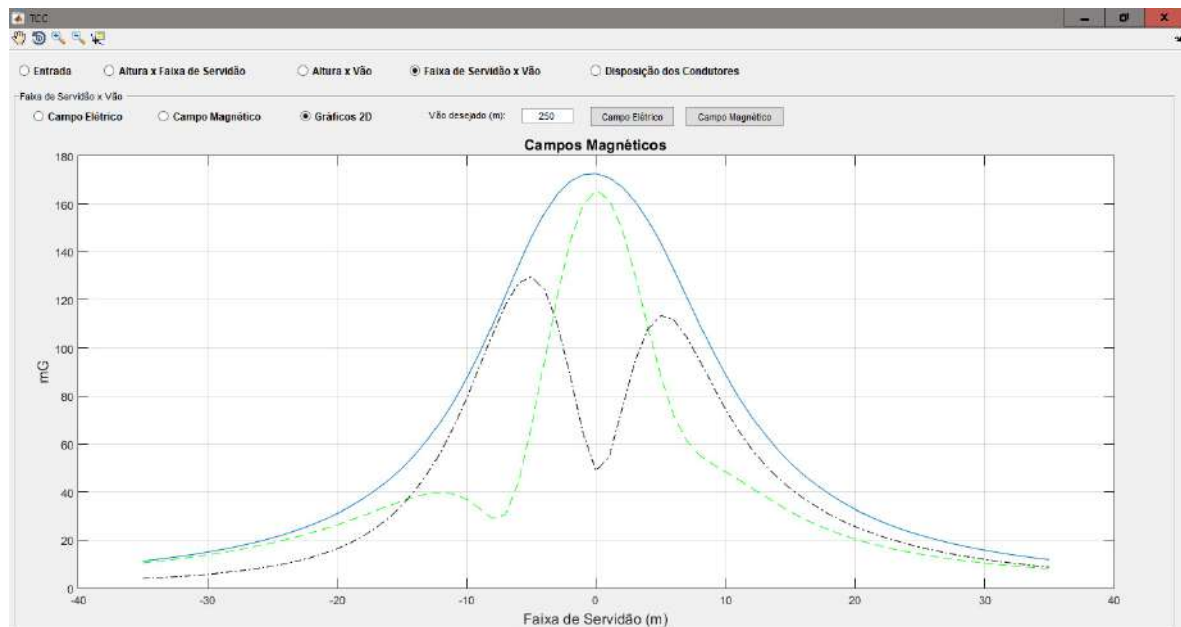
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o campo magnético segue-se da mesma forma. Graficamente os dois resultados apresentam o mesmo formato, mas o campo calculado através do *software* tem valores um pouco maiores que os apresentados no relatório: 172,5 mG e 165 mG de valor máximo,

Figura 4.15 – Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão.



Fonte: CHESF (2008).

Figura 4.16 – Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o *software* proposto.

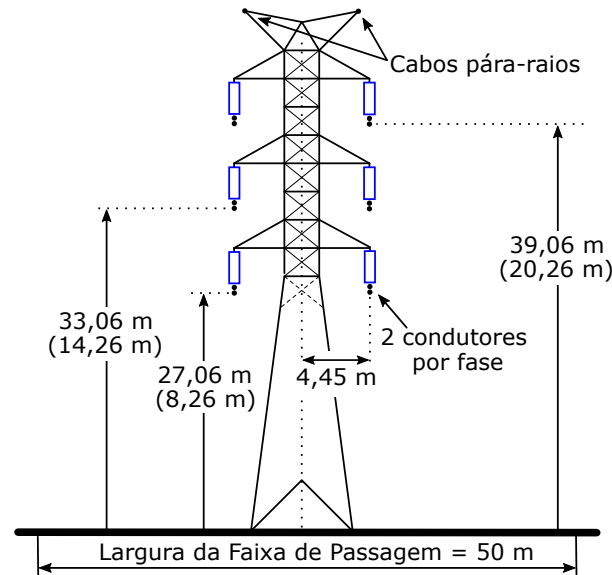
Fonte: Elaborada pelo autor.

respectivamente. Isto representa um erro de 4,4%.

### 4.1.3 LT 230 kV Campina Grande II - Natal II

Os dados desta LT e a disposição geométrica dos condutores na torre, que está apresentada na Figura 4.17, estão apresentados no relatório CHESF (2009a).

Figura 4.17 – LT 230 kV Campina Grande II - Natal II.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A entrada de dados está apresentada na Figura 4.18 e nas Figuras 4.19 e 4.20 estão apresentados os resultados.

Figura 4.18 – Entrada de dados para a LT 230 kV Campina Grande II - Natal II.

TCC

Entrada

Altura máxima para cálculo (m): 50 (Faixa de Serviço x Vão) Altura para medição (m): 1

Carregar Arquivo... Faixa de serviço (m): 50 (Altura x Vão) Faixa de Serviço para medição (m): 0

Vão entre duas torres (m): 500 (Altura x Faixa de Serviço) Vão para medição (m): 250

Calcular

Tolerância para plotagem (m): 2

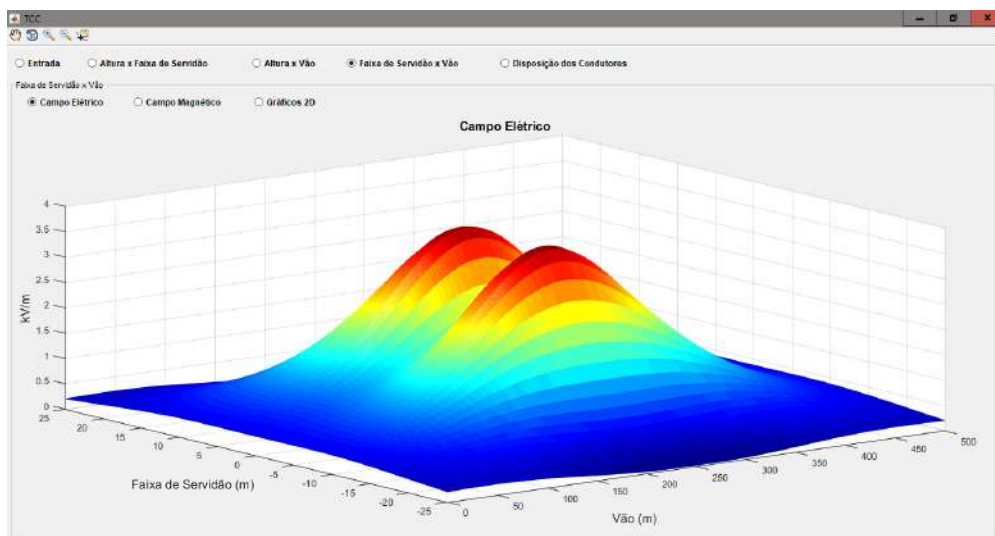
| Fase do Condutor | x (m) | y (m)   | Raio (m) | RMG (m) | Peso Nominal (kg/m) | Carga de Ruptura (kgf) | abs(Vfase) | ang(Vfase) | abs(lilinha) | ang(lilinha) |     |
|------------------|-------|---------|----------|---------|---------------------|------------------------|------------|------------|--------------|--------------|-----|
| 1                | 1     | -4.4500 | 39.0600  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 120          | 1594         | 120 |
| 2                | 1     | -4.4500 | 39.5170  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 120          | 1594         | 120 |
| 3                | 2     | -4.4500 | 33.0600  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 0            | 1594         | 0   |
| 4                | 2     | -4.4500 | 33.5170  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 0            | 1594         | 0   |
| 5                | 3     | -4.4500 | 27.0600  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 240          | 1594         | 240 |
| 6                | 3     | -4.4500 | 27.5170  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 240          | 1594         | 240 |
| 7                | 4     | 4.4500  | 27.0600  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 120          | 1594         | 120 |
| 8                | 4     | 4.4500  | 27.5170  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 120          | 1594         | 120 |
| 9                | 5     | 4.4500  | 33.0600  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 0            | 1594         | 0   |
| 10               | 5     | 4.4500  | 33.5170  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 0            | 1594         | 0   |
| 11               | 6     | 4.4500  | 39.0600  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 240          | 1594         | 240 |
| 12               | 6     | 4.4500  | 39.5170  | 0.0126  | 0.0098              | 1.3028                 | 541.3896   | 1.3972e+05 | 240          | 1594         | 240 |

Fonte: Elaborada pelo autor.



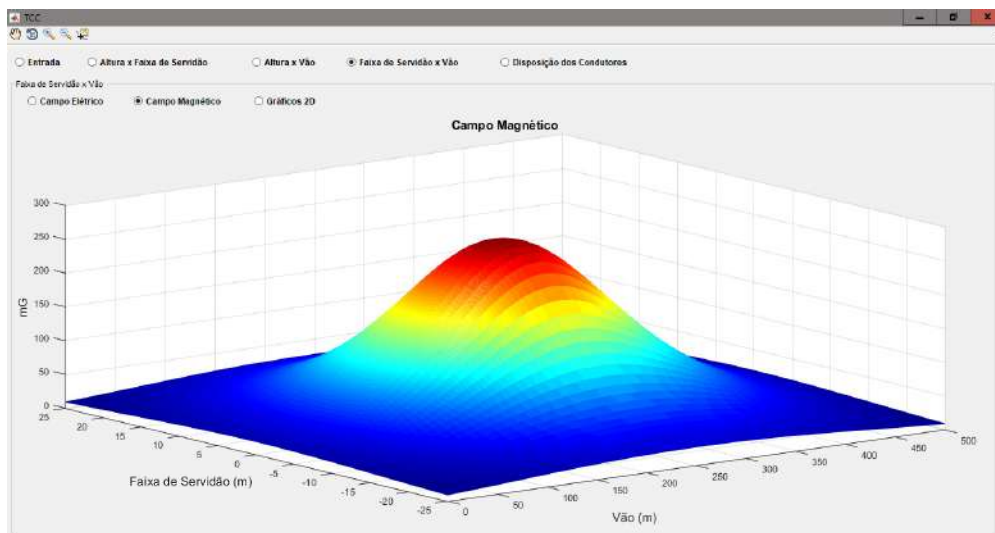
Tem-se dois condutores por fase, do tipo Grosbeak, espaçados de 0,457 m. Este tipo de condutor apresenta, segundo catálogo da fabricante Nexans, peso nominal de 1,3028 kg/m e raio de 0,01258 m. A LT apresenta vão típico de 500 m e as distâncias dos condutores para o solo, nos pontos de flechas máximas, estão dadas entre parênteses na Figura 4.17. Calculando a carga de ruptura típica utilizada neste projeto, encontra-se o valor 541,39 kgf para todos os condutores.

Figura 4.19 – Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo elétrico, para uma altura de 1 m.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.20 – Gráfico Faixa de servidão x Vão do campo magnético, para uma altura de 1 m.



Fonte: Elaborada pelo autor.

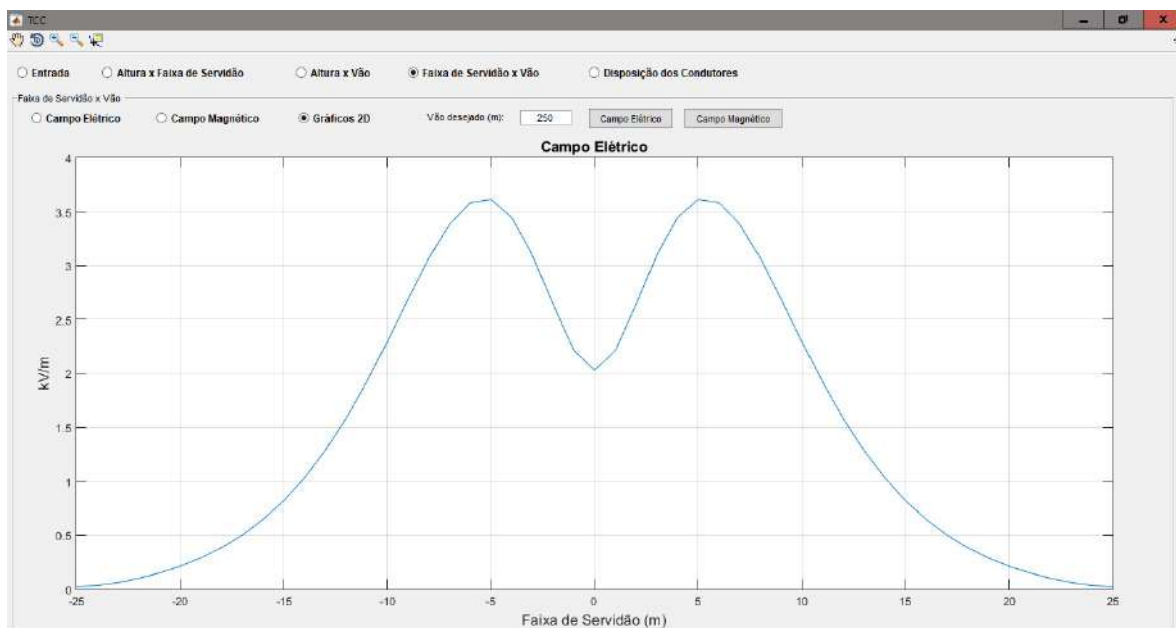
Para este caso, a tensão máxima operativa é de 242 kV e a corrente máxima é de 1594 A. Comparando graficamente os resultados obtidos com os apresentados no relatório, vê-se nas Figuras 4.21 e 4.22 que o campo elétrico máximo é igual nos dois gráficos, enquanto que no eixo central o campo apresentado no relatório é de, aproximadamente, 1,85 kV/m e no *software*, 2,03 kV/m. Isto representa um erro em torno de 8,87%.

Figura 4.21 – Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão.



Fonte: CHESF (2009a).

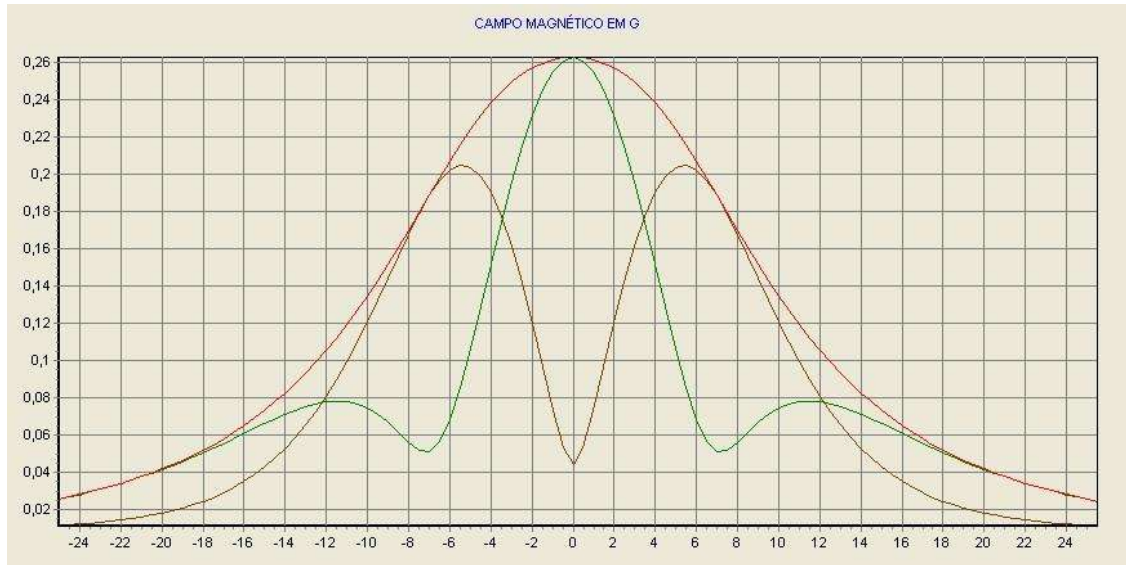
Figura 4.22 – Campo elétrico a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o *software* proposto.



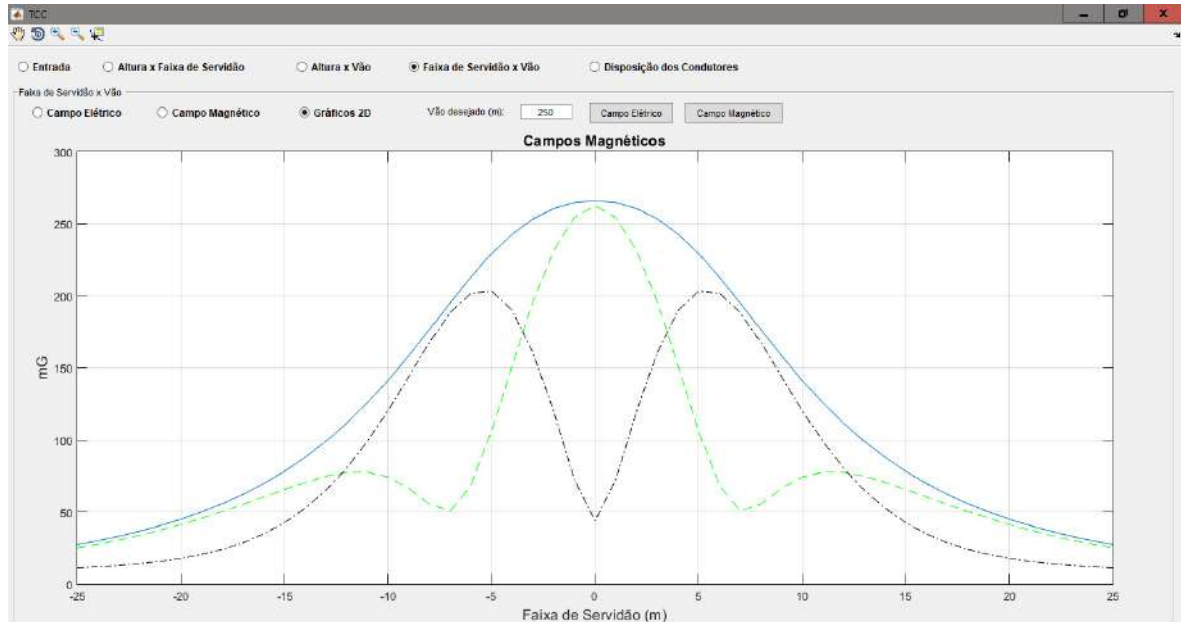
Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 4.23 – Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão.



Fonte: CHESF (2009a).

Figura 4.24 – Campo magnético a 1 m do solo no meio do vão, obtido com o *software* proposto.

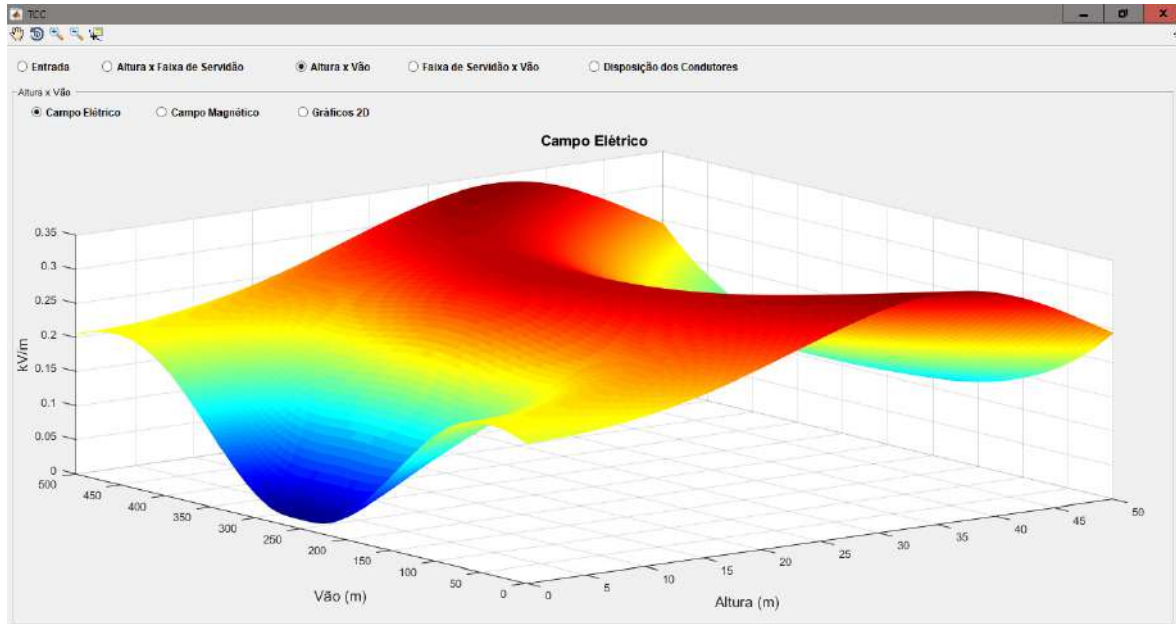
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o campo magnético vê-se nas Figuras 4.23 e 4.24 que o valor máximo apresentado pelo *software* é de 266 mG, enquanto no relatório pode-se assumir visualmente que o mesmo valor foi encontrado.

Analisando os campos por outra perspectiva, temos os gráficos dos CEM para os

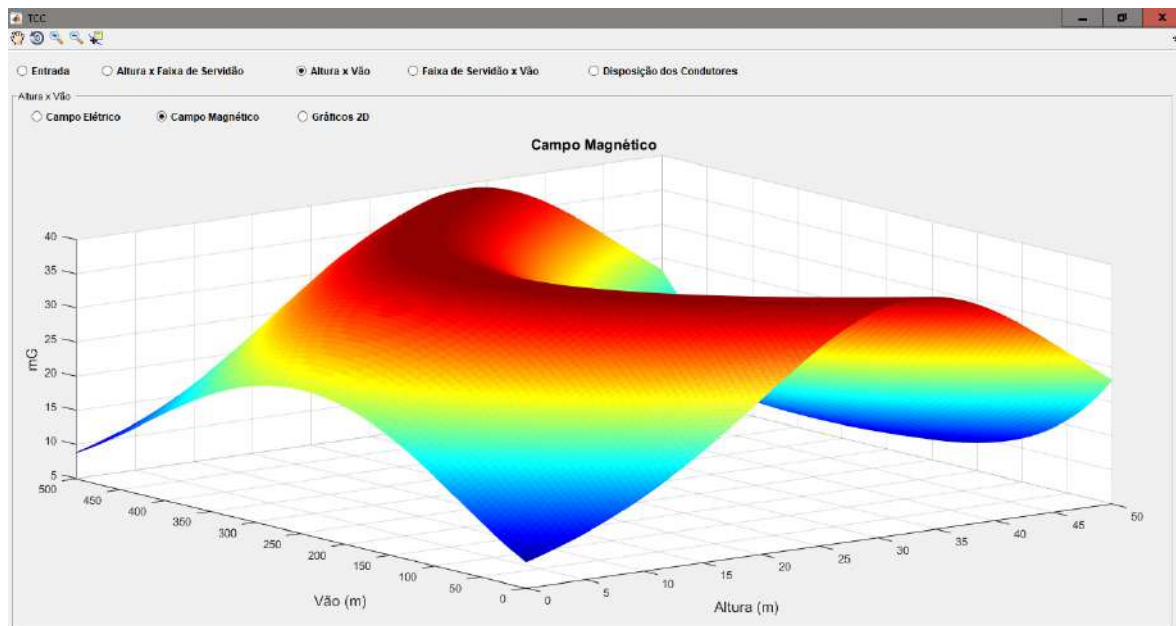
eixos altura e vão, no limite da faixa de servidão, apresentados nas Figuras 4.25 e 4.26.

Figura 4.25 – Gráfico Altura x Vão do campo elétrico, no limite da faixa de servidão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.26 – Gráfico Altura x Vão do campo elétrico, no limite da faixa de servidão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vê-se que quanto mais próximo dos condutores, maiores são os campos. No entanto, estes não apresentam valores tão grandes quanto os apresentados anteriormente, pois a

análise foi feita para o limite da faixa de servidão, ou seja, a 25 m do eixo central da torre. Para esta distância os campos já apresentam uma diminuição considerável nos seus valores.

## 4.2 Conclusões do Capítulo

Os campos apresentados nos relatórios foram calculados utilizando uma rotina computacional do sistema de programas SIGA do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) (CHESF, 2008; CHESF, 2009a; CHESF, 2009b), enquanto os resultados apresentados pelo aplicativo seguem os equacionamentos apresentados no Capítulo 2. Como não se sabe como os campos são calculados através das rotinas do CEPEL, não se pode dizer que os valores encontrados através do *software* proposto estão incoerentes, já que a curva dos campos é semelhante e os erros apresentados foram de menos de 10%. Para saber o erro verdadeiro cometido pelas simulações, seria necessário realizar medições físicas e obter o valor real dos campos gerados pelas LTs.



# 5 Conclusões

## 5.1 Conclusões Gerais

Neste trabalho foi proposto um *software* baseado em MATLAB® que realiza o cálculo dos campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão de energia, apresentando gráficos tridimensionais que facilitam a análise destes campos em qualquer ponto da linha de transmissão. O *software* aceita como entrada de dados tabelas de Excel®, onde devem ser descritos os parâmetros dos condutores, tensões e correntes atuantes e posições geométricas destes, além de receber dados do sistema de transmissão e de parâmetros de cálculo que devem ser inseridos diretamente pelo aplicativo.

A preocupação com os CEM cresceu após a publicação do relatório de Wertheimer e Leeper (1979), apontando uma possível associação entre o câncer infantil e os CEM gerados pelas LTs. Como precaução normas foram criadas estabelecendo limites para a exposição humana a esses campos, fazendo com que eles sejam calculados e analisados mesmo em fase de projeto. Foi demonstrado como os CEM são calculados para um ponto qualquer no espaço e, como os condutores das LTs descrevem catenárias nos vãos entre duas torres, foi apresentado como calcular este efeito. Com isso, o cálculo dos campos se torna mais preciso para qualquer ponto desejado.

A partir do cálculo dos campos para um ponto qualquer no espaço, foi demonstrado como se pode chegar a resultados apresentados em gráficos tridimensionais. Isto posto, a implementação dos equacionamentos em código MATLAB® foi descrita e a interface inicial do *software* foi apresentada. Com isso, foram realizados três estudos de caso de LTs de 230 kV da CHESF. Os resultados foram comparados com relatórios de estudos da CHESF, que indicam os níveis de CEM a uma altura de 1 m no meio do vão, e apresentaram erros de menos de 10% em alguns pontos do espaço calculado. Todos os gráficos apresentaram formatos iguais, confirmando a coerência dos resultados obtidos.

Conclui-se que o *software* proposto funciona corretamente, visto que os erros apresentados foram pequenos. Como os valores de CEM apresentados nos relatórios da CHESF foram obtidos através de simulações, não se pode declarar que os erros apresentados pelo *software* são erros reais. Para uma melhor análise destes erros, seriam necessárias medições físicas, reais, dos CEM gerados pelas LTs estudadas.

Ainda, diante dos resultados apresentados pelo *software*, é possível enxergar como os fenômenos analisados se comportam, fazendo do aplicativo uma possível ferramenta didática de apoio ao ensino de CEM em LTs.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Visando a melhoria do *software* proposto, são apresentadas sugestões para o prosseguimento deste trabalho:

- Inserção da opção de solos irregulares no *software*, o que traria resultados ainda mais próximos da realidade;
- Implementar o cálculo de outros fenômenos gerados pelas LTs, tais como rádio interferência e campo elétrico superficial;
- Inserir a influência dos cabos pára-raios e das estruturas das torres no cálculo dos CEM;
- Calcular parâmetros dos condutores, tais como indutância e capacitância.

## Referências

- ABDEL-SALAM, M.; EL-MOHANDES, M. T. Combined method based on finite differences and charge simulation for calculating electric fields. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 25, n. 6, p. 1060–1066, 1989. Citado na página 23.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. *Acompanhamento dos Empreendimentos de Transmissão*. 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relatorio+de+Monitoramento+de+Empreendimentos+de+Transmissao/4e3403a7-44bd-4d6f-bad1-4e9fea56f79d?version=1.22>>. Acesso em: Novembro de 2017. Citado na página 43.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELETRICA. *Sistema Interligado*. Brasil, 2015. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/sistema-interligado>>. Acesso em: Setembro de 2017. Citado na página 18.
- BEGAMUDRE, R. D. *Extra High Voltage AC Transmission Engineering*. 3. ed. Nova Delhi - Índia: New Age International, 2006. Citado na página 32.
- COMPANHIA HIDRO ELETRICA DO SÃO FRANCISCO. *LT 230kV Jardim - Penedo: Cálculos dos campos elétricos e magnéticos e das interferências eletromagnéticas*. Recife - PE - Brasil, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 47, 48, 50, 51 e 57.
- COMPANHIA HIDRO ELETRICA DO SÃO FRANCISCO. *LT 230kV Campina Grande II - Natal II: Cálculos dos campos elétricos e magnéticos e das interferências eletromagnéticas*. Recife - PE - Brasil, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 52, 54, 55 e 57.
- COMPANHIA HIDRO ELETRICA DO SÃO FRANCISCO. *LT 230kV Pau Ferro - Santa Rita II: Cálculos dos campos elétricos e magnéticos e das interferências eletromagnéticas*. Recife - PE - Brasil, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 43, 44, 45, 46 e 57.
- DEIN, A. Z. E. Calculation of the electric field around the tower of the overhead transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 2, p. 899–907, 2014. Citado na página 23.
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above*. 3. ed. Palo Alto - CA - Estados Unidos: EPRI, 2005. Citado 9 vezes nas páginas 20, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31 e 32.
- FUCHS, R. D. *Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente*. Rio de Janeiro - RJ - Brasil: Livros Técnicos e Científicos, 1977. v. 2. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.
- FUCHS, R. D. et al. *Projeto Mecânico das Linhas Aéreas de Transmissão*. 2. ed. São Paulo - SP - Brasil: Edgard Blücher Ltda., 1992. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.
- HABIB, M. A. et al. Investigation of electric field intensity and degree of uniformity between electrodes under high voltage by charge simulation method. In: *2014 17th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 185–191. Citado na página 23.

- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELETRICO. *O Que é o SIN - Sistema Interligado Nacional*. 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: Setembro de 2017. Citado na página 18.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELETRICO. *Sistemas Isolados*. Brasil, 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>>. Acesso em: Setembro de 2017. Citado na página 18.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAUDE. *Electromagnetic fields and public health*. [S.l.], 2007. Disponível em: <<http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322/en/>>. Acesso em: Setembro de 2017. Citado na página 20.
- PINTO, M. de O. *Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados*. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ - Brasil: Livros Técnicos e Científicos, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-93, n. 5, p. 1660–1668, 1974. Citado na página 23.
- WANG, D. et al. 3-d electric field computation with charge simulation method around buildings near hv transmission lines. In: *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–1. Citado na página 23.
- WERTHEIMER, N.; LEEPER, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*, v. 109, p. 273–284, 1979. Citado 3 vezes nas páginas 7, 20 e 59.