

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 404

MEDIÇÕES E CÁLCULOS DE CAMPOS
ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE UMA
LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 kV

Gernan Edson Guimarães

DATA DA DEFESA: 20/05/2005

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MEDIÇÕES E CÁLCULOS DE CAMPOS ELÉTRICOS E
MAGNÉTICOS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 kV**

Gernan Edson Guimarães

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino

Belo Horizonte - MG

Maio de 2005

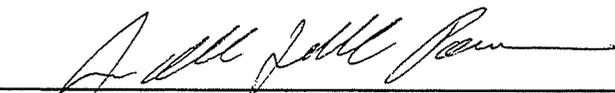
**"MEDIÇÕES E CÁLCULOS DE CAMPOS
ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE UMA LINHA
DE TRANSMISSÃO DE 500 KV "**

GERNAN EDSON GUIMARÃES

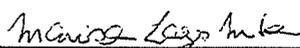
Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de *Mestre em Engenharia Elétrica*.

Aprovada em 20 de maio de 2005.

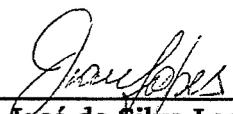
Por:



José Osvaldo Saldanha Paulino – Dr.
Prof. DEE/EEUFMG – orientador



Marisa Lages Murta – Dra.
Enga. CEMIG – co-orientadora



Ivan José da Silva Lopes – Dr.
Prof. DEE/EEUFMG



Marco Aurélio de Oliveira Schroeder – Dr.
Prof. CEFET/MG

Resumo

Com o crescimento das cidades e o conseqüente envolvimento dos sistemas de transmissão por regiões habitadas, o compartilhamento da faixa de servidão das linhas de transmissão de energia com outras instalações e a necessidade de garantir que as pessoas não estejam expostas a quaisquer campos eletromagnéticos que possam ser prejudiciais à saúde, torna-se necessário o desenvolvimento de procedimentos eficazes para a determinação desses campos.

Este trabalho apresenta uma avaliação de procedimentos de cálculo e medições dos campos elétricos e magnéticos disponíveis na literatura, através da caracterização dessas grandezas nas vizinhanças de uma linha de transmissão de energia de 500kV.

Com a utilização de procedimentos de medições, é realizado um mapeamento dos campos elétricos e magnéticos em toda a extensão de um vão da linha de transmissão. As principais variáveis necessárias para o cálculo dos campos, tais como distâncias envolvidas, correntes e tensões foram obtidas através de um levantamento de dados detalhado com a utilização de equipamentos de precisão. Um programa para o cálculo dos campos elétricos e magnéticos baseado em equações analíticas foi desenvolvido e foram realizadas simulações para os pontos das medições com as variáveis obtidas no levantamento de dados detalhado.

Uma análise das diferenças entre os valores medidos e calculados é realizada através da comparação dos resultados, onde é avaliada a influência das variáveis de entrada nas simulações. A análise mostra que procedimentos simplificados de cálculo podem ser eficazes na determinação dos campos elétricos e magnéticos nas proximidades de linhas de transmissão ao nível do solo, se as variáveis de entrada forem bem definidas.

Abstract

Nowadays, there is an increased concern about electric and magnetic fields in the environment. Since power facilities have been identified as sources of electromagnetic fields, there is a great interest in determining magnetic and electric fields generated from transmission lines.

This work presents measurements and calculations of electric and magnetic fields generated from a 500 kV overhead transmission line.

Measurement procedures proposed by literature were utilized to measure magnetic and electric fields in the vicinity of a transmission line. In order to calculate the field values, the main variables were considered and evaluated by precise instruments.

In addition, analysis of the presence of obstacles in the span, such as distribution line, fences and vegetation was developed. A program was developed to calculate electric and magnetic fields using analytical equations.

The comparison between measurements and calculations shows that simple methods can be effective to determine magnetic and electric fields closed to ground level in the vicinity of transmission lines, since system's characteristics are well known.

Agradecimentos

Ao professor José Osvaldo Saldanha Paulino, pela confiança, incentivo e orientação que possibilitaram a realização deste trabalho;

À professora e amiga Marisa Lages Murta pelo incentivo e orientação dedicada que foi indispensável em todas as etapas deste trabalho;

Aos colegas da CEMIG pelo apoio e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho. E em especial aos companheiros de medição Edino, Artur, Luis Fernando, Silvão e Sergio Soeiro pelo apoio indispensável em fase tão importante do trabalho.

À amiga Ana Claudia e aos amigos Leonardo Aquino, Gustavo Reggiani que colaboraram para este trabalho.

À biblioteca da CEMIG pela valiosa fonte de informações.

À Companhia Energética de Minas Gerais, pelo suporte financeiro ao Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) do qual este trabalho é parte e pela escola de sempre.

A toda minha família, meus irmãos, tios, sobrinhos e cunhadas pela paciência durante as fases da minha formação. Ao meu pai e a minha mãe pelo exemplo de vida.

A todos aqueles que contribuíram, de uma forma ou de outra, para a realização deste trabalho.

Sumário

Resumo	2
Abstract	3
Agradecimentos	4
1 – Introdução	7
1.1 Introdução	7
1.2 Revisão Bibliográfica	8
1.3 Organização do Texto	14
2 – Campos Elétricos e Magnéticos de Linhas de Transmissão de Energia	16
2.1 Introdução	16
2.2 Unidades de Medida	17
2.3 Campos Elétricos e Magnéticos de Linhas de Transmissão	18
2.4 Procedimentos de Medição	21
2.4.1 Medidor de campo magnético	22
(a) teoria de operação	23
2.4.2 Medidor de campo elétrico	24
(a) teoria de operação	25
2.5 Procedimentos de Cálculo	27
2.5.1 Cálculo do campo magnético	27
2.5.2 Cálculo do campo elétrico	32
3 – Caracterização do Ambiente Eletromagnético de uma Linha de Transmissão de Energia de 500 kV	36
3.1 Introdução	36
3.2 Levantamento dos Dados do Vão	36
3.3 Determinação dos Valores de Campos Elétricos e Magnéticos	39
3.3.1 Medições dos campos elétricos e magnéticos	39
(a) considerações sobre as medições do campo magnético	41
(b) considerações sobre as medições do campo elétrico	43
3.4 Cálculo dos Campos Elétricos e Magnéticos	44
3.4.1 Considerações sobre as simulações	44
3.4.2 Variáveis de Entrada	46

4 – Análise dos Resultados das Medições e Cálculos	48
4.1 Introdução	48
4.2 Resultados das Medições e Cálculos	48
4.3 Análise dos Resultados	54
4.3.1 Regiões com presença de obstáculos	54
4.3.2 Região de menor altura cabo solo	63
4.3.3 Região de maior inclinação dos condutores	69
4.4 Considerações finais sobre as comparações	72
4.4 Comparações com normas e diretrizes	73
5 – Conclusões	75
5.1 Propostas de Continuidade	77
Referências Bibliográficas	79
Apêndice A – Dados de entrada para as simulações	81

1 Introdução

1.1 Introdução

O Brasil é um país em desenvolvimento e sinaliza a possibilidade de crescimento nos próximos anos. Para que esse crescimento seja sustentado será necessária a criação de uma infra-estrutura básica para atendimento das novas demandas. Os estudos de planejamento do sistema de energia mostram a necessidade de expansão da capacidade do sistema com a implantação de novas linhas de transmissão e a recapitação dos ativos existentes, para garantir o atendimento das demandas no fornecimento de energia com uma maior confiabilidade e qualidade [1].

Por outro lado, nos últimos anos o questionamento em torno das emissões eletromagnéticas geradas pelos sistemas de energia vem ganhando destaque no Brasil [1]. Com o crescimento das cidades, os sistemas de transmissão, que antes ficavam distantes das regiões populacionais, são envolvidos pela expansão dessas regiões. Com isso, o número de pessoas que vivem e trabalham nas vizinhanças de linhas de transmissão e de distribuição de energia é cada vez maior. Por razões de segurança, deve-se garantir que essas pessoas não estejam expostas a campos eletromagnéticos superiores aos recomendados por normas de segurança.

Normas e diretrizes internacionais que recomendam limites para exposição a campos elétricos e magnéticos [2] e recomendações para os procedimentos de determinação desses campos através de medições [3,4], bem como procedimentos de cálculos para os campos gerados pelas Linhas de Transmissão de Energia (LT) [5] são amplamente divulgados na literatura internacional. Entretanto, a falta de uma normatização brasileira que defina os limites de exposição e os procedimentos para determinação dos campos elétricos e magnéticos dos sistemas de energia têm sido utilizados por alguns membros da sociedade para questionamentos na justiça. Essas ações já resultaram na ocorrência de alguns casos de embargos em obras de novas

instalações e melhorias das existentes, levando a atrasos nos cronogramas de implantação e trazendo prejuízos econômicos para o Brasil e sua sociedade [1].

Dessa forma, além da avaliação dos limites recomendados pelas normas e diretrizes internacionais, torna-se necessária a avaliação dos procedimentos publicados na literatura internacional para a determinação dos campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão de energia através de medições e cálculos.

Um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) aprovado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) está sendo desenvolvido através de um convênio entre a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) e a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), com a proposta de desenvolver uma metodologia para a determinação das intensidades dos campos elétricos e magnéticos nas vizinhanças de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.

Este trabalho é parte desse projeto de pesquisa e tem como objetivo principal avaliar um procedimento de medição e um procedimento de cálculo, recomendados pela literatura, bem como avaliar a influência das variáveis de entrada no procedimento de cálculo através de comparações entre os resultados das medições e cálculos.

1.2 Revisão Bibliográfica

A determinação dos campos elétricos e magnéticos de LT não é uma atividade recente. Em 1967, Charles J. Miller realizou um trabalho de medição de campos elétricos em LT para avaliação das correntes elétricas induzidas nos corpos dos trabalhadores de manutenção. Nesse trabalho é feita uma descrição dos equipamentos disponíveis naquela época [6].

Na década de 70, com a crescente utilização de linhas de extra alta tensão na América do Norte, surgiu a necessidade do desenvolvimento de técnicas de

cálculo e medição de campos elétricos e magnéticos, tensões e correntes induzidas em objetos e pessoas, dentre outras interferências causadas pelas linhas de transmissão de energia [5]. Esse fato resultou no desenvolvimento de vários projetos como o “Project UHV” patrocinado pelo EPRI (“Electric Power Research Institute”) [5], o “Electrostatic and eletromagnetic measurements program” da BPA (“Bonneville Power Administration”) [8], e a formação do grupo de trabalho “IEEE Working Group on Electrostatic and Electromagnetic Effects of Transmission Lines” pelo IEEE [9]. Esses projetos resultaram em várias publicações definindo as características dos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão de energia e os procedimentos de medição e cálculos desses campos [4].

Deno publicou em 1976 um trabalho em que descrevia as características dos campos elétricos e magnéticos de LT através das suas componentes espaciais horizontais e verticais e através da representação da elipse [7]. Nesse trabalho, são apresentados resultados de medições e cálculos para uma LT de 765 kV, onde foram mapeados os campos numa seção transversal aos condutores através da representação da elipse. São apresentadas e analisadas comparações entre valores medidos e calculados de campo nas proximidades do solo (1m) através de perfis transversais ao sentido da LT. Também são apresentadas técnicas de medições desses campos. Esse trabalho é parte dos resultados do “Project UHV” patrocinado pelo EPRI.

Bracken publicou em 1976 um trabalho onde apresentou resultados parciais do “Electrostatic and eletromagnetic measurements program” da BPA e do “IEEE Working Group on Electrostatic and Electromagnetic Effects of Transmission Lines” [8]. Nesse trabalho, são apresentados os princípios de funcionamento do equipamento de medição desenvolvido para o projeto da BPA e uma comparação entre equipamentos similares utilizados em outros projetos. São apresentados os procedimentos de cálculo e medição para os campos elétricos e os resultados da utilização desses procedimentos para uma LT de 525 kV. Também são apresentados resultados de correntes e tensões induzidas em objetos e níveis de percepção e incômodo para homens, mulheres e crianças.

O relatório do grupo de trabalho “IEEE Working Group on Electrostatic and Electromagnetic Effects of Transmission Lines” publicado em 1978 estabelece procedimentos para a medição de campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão de energia elétrica de corrente alternada em regime permanente [9]. Nesse relatório são apresentadas as características gerais e de operação dos medidores, os procedimentos de calibração, os parâmetros que afetam a precisão e a imunidade a interferências. São apresentados os procedimentos onde a medição do campo elétrico deve ser feita com o medidor a 1,0 m de altura, orientado na posição vertical e o operador deve ficar a, no mínimo, 2,5 m de distância do equipamento de medição. Se possível, as medições devem ser feitas em uma região livre de objetos, edificações, vegetação, etc. Na medição do campo magnético o medidor deve ser posicionado também a 1,0 m de altura. As medições do campo elétrico e do campo magnético devem ser feitas ao longo da linha (perfil longitudinal) e também em um perfil perpendicular ao eixo da linha (perfil lateral).

A referência [4] é a revisão das versões de 1979 e 1987 da norma IEEE Std 644 que define os procedimentos para medição, calibração e os equipamentos a serem utilizados para medições de campos elétricos e magnéticos nas proximidades do solo de linhas de transmissão de energia elétrica de corrente alternada. Os procedimentos que constam nessa norma são basicamente os resultados dos trabalhos realizados e apresentados em [9].

Deno e Zaffanella escreveram o capítulo 8 “Field Effects of Overhead Transmission Lines and Stations” do livro “Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above, 2d ed.” [5] publicado em 1982, onde são apresentados os resultados do “Project UHV”. Nesse capítulo são apresentadas as definições dos campos elétricos e magnéticos, os procedimentos de cálculo e medições, curvas generalizadas para a definição dos campos elétricos máximos nas proximidades do solo e resultados das medições do projeto. Também é apresentado um estudo detalhado sobre as tensões e correntes induzidas em objetos e pessoas sob as linhas de transmissão de energia.

Depois que alguns trabalhos epidemiológicos foram publicados associando a exposição a campos magnéticos de longo prazo como possível causa de leucemia e câncer no cérebro, vários trabalhos foram desenvolvidos abordando a determinação de campos magnéticos nas vizinhanças de linhas de transmissão e em residências [2].

A referência [11] é um estudo de um grupo de trabalho do IEEE publicado em 1988 que apresenta uma análise detalhada sobre o cálculo dos campos magnéticos de linhas. O trabalho propõe expressões para o cálculo do campo magnético considerando o retorno pelo solo e considera que os campos magnéticos de linhas de transmissão e distribuição podem ser calculados com precisão se não existirem objetos metálicos enterrados nas proximidades das linhas (inclusive hastes e cabos de aterramento), se o solo for homogêneo e se forem conhecidas as correntes e o seu desequilíbrio. Considera que devido à variação da carga ao longo do dia as correntes e, conseqüentemente, os campos magnéticos devem ser tratados de forma estatística.

Olsen publicou em 1992 um trabalho sobre a natureza dos campos eletromagnéticos de linhas de transmissão de frequência industrial (50 – 60 Hz) [12]. Nesse trabalho, ele mostra que os campos elétricos e magnéticos de LT podem ser calculados através do desacoplamento das equações de Maxwell na quase-estática sendo dependentes diretamente da tensão e das correntes, respectivamente. Mostra quando os dois campos podem ser relacionados pela impedância intrínseca do ar e qual é a parcela dos campos que é radiada. Considera que a LT pode ser tratada como uma fonte de duas dimensões e mostra a transmissão de energia através do vetor de Poynting.

Dawalibi publicou em 1993 [13,14] dois artigos onde apresentou um programa de cálculo de campo tridimensional baseado na resolução numérica das integrais de Sommerfeld. O programa permite a simulação de condutores no ar e enterrados no solo. Os autores utilizaram o programa implementado para o cálculo dos campos elétrico e magnético em uma residência nas proximidades de uma linha de distribuição. Todos os cabos da rede de distribuição, canos e cabos enterrados e fiação interna da residência são considerados nos cálculos.

Olsen publicou em 1993 um artigo onde ressaltou a importância de se dar um tratamento estatístico aos valores calculados de campo magnético, tendo-se em vista as variações de corrente e de desequilíbrio nas linhas [15]. Variações ao longo do dia e do ano bem como das condições ambientais (temperatura e vento) influenciam bastante os valores de campo.

Maruvada publicou em 1995 um trabalho sobre a utilização das faixas de servidão das linhas de alta tensão como ambientes para a construção de quadras de recreação e parques para uso da população [16]. Tal prática já é adotada no Canadá por empresas tais como a Hydro-Québec, cujas instalações ocupam cerca de 1% da área do estado de Québec. As áreas das faixas de servidão, em geral, são alugadas para os empreendimentos. O estudo analisou os riscos à saúde devido aos campos magnéticos das linhas de transmissão. Os campos magnéticos foram calculados utilizando-se uma metodologia simplificada, foi realizada uma série de medições e apresentada a comparação entre os valores medidos e calculados. O artigo faz uma análise sobre o tempo médio de permanência das pessoas nas áreas, em função do tipo de atividade realizada e propõe uma metodologia para a determinação do grau de exposição.

Mamishev publicou em 1996 um trabalho sobre a influência da flecha dos condutores de redes de distribuição (tensões inferiores a 35 kV) no cálculo dos campos magnéticos [17]. O trabalho apresenta formulações para o cálculo considerando a equação da catenária e com formulações aproximadas através de parábolas, devido à dificuldade de solução das funções hiperbólicas no primeiro caso. Apresenta comparações entre cálculos considerando o modelo utilizando a catenária e o modelo bidimensional que considera os condutores paralelos ao solo e infinitos.

A norma IEC 61786:1998 [3] fornece um guia para medição dos valores eficazes de regime-permanente de campos elétricos e magnéticos quase-estáticos que têm componentes de frequência que variam de 15 Hz a 9 kHz. Essa norma identifica os requisitos de especificação de medidores de campo,

indica métodos de calibração e orienta na definição de protocolos de medição dos campos elétrico e magnético.

Liu apresentou em 2002 um trabalho referente ao cálculo de campos gerados por linhas de transmissão e distribuição [18]. O cálculo dos campos é feito utilizando-se um programa computacional baseado no método dos momentos e permite a simulação de cabos aéreos e enterrados. O trabalho apresenta uma análise paramétrica onde são avaliados os efeitos dos cabos pára-raios, desequilíbrio de correntes, resistividade do solo e os efeitos de blindagem devido à proximidade de estruturas metálicas. Os resultados mostram que os efeitos devido à consideração ou não dos cabos pára-raios são mínimos. Mostra que os campos elétricos são bem sensíveis devido à proximidade de estruturas metálicas e os campos magnéticos sofrem apenas pequenas distorções. Para uma variação da resistividade do solo de 10, 100, 1000 e 5000 ohm.m os resultados não apresentam uma influência significativa para a condição de carga normal.

Domingues publicou em 2003 um trabalho sobre cálculo e medição de campos nas proximidades de linhas de transmissão (138, 230, 345, 500 e 765 kV) do sistema da empresa Furnas Centrais Elétricas [19]. Os cálculos foram realizados utilizando-se programas tridimensionais desenvolvidos no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) e baseados em técnicas de elementos de contorno e simulação de cargas, que permitiram a representação das flechas, dos cabos pára-raios e das torres. Foram realizadas medições de campo em três perfis transversais às linhas, um no ponto onde a altura das fases é menor, um na proximidade da torre e um terceiro localizado entre o primeiro e o segundo. Para cada linha foram realizadas medições em três vãos: um localizado em terreno plano e sem vegetação, outro localizado em terreno plano com vegetação e um terceiro localizado em terreno acidentado (preferencialmente um vale). Foi feito um levantamento topográfico dos terrenos e as alturas dos condutores foram determinadas durante as medições. Os valores medidos estão abaixo dos limites recomendados por norma [2].

Ferreira em 2003 publicou um trabalho onde são avaliados vários métodos para a determinação dos valores dos campos elétricos e magnéticos nas proximidades de linhas de transmissão [20]. Foram avaliados os métodos analíticos, numéricos, medição direta e métodos “estimativos”. A autora conclui que devido a uma série de fatores tais como: desequilíbrio de correntes, correntes circulando no solo, variação da catenária, presença de edificações, objetos, cercas e árvores, o melhor método é o método “estimativo”. Nesse método o maior valor de campo é calculado analiticamente, considerando-se as condições mais críticas. A seguir uma série de fatores de correção, que consideram a distância do ponto de interesse à linha, a resistividade do solo, a presença de objetos e edificações/árvores, a altura de interesse, etc. são aplicados para se determinar os valores dos campos. Os vários fatores são aplicados simultaneamente. O artigo propõe valores típicos para alguns dos fatores de correção.

1.3 Organização do Texto

Esta dissertação é composta de cinco capítulos e um apêndice, conforme descrito a seguir.

O presente capítulo, *Introdução*, apresenta as principais motivações no desenvolvimento deste trabalho, bem como uma breve revisão bibliográfica do tema em investigação.

O segundo capítulo, *Campos Elétricos e Magnéticos de Linhas de Transmissão de Energia*, apresenta os procedimentos de medição e cálculo de campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão de energia encontrados na literatura.

No capítulo 3, *Caracterização do Ambiente Eletromagnético de uma Linha de Transmissão de Energia de 500 kV*, os campos elétricos e magnéticos de um vão de uma LT de 500 kV são medidos e simulados. Para a caracterização do ambiente, foram feitos um detalhado levantamento topográfico do vão e a determinação das principais características da LT, como as alturas cabo-solo,

correntes e tensões nas fases, variação da catenária, presença de objetos, cercas e árvores. Em seguida, são descritos os procedimentos e considerações de cálculo e medição adotados na determinação dos campos elétricos e magnéticos.

O capítulo 4, *Análise dos Resultados das Medições e Cálculos*, apresenta comparações entre os valores de campos elétricos e magnéticos medidos e calculados, ressaltando a importância das variáveis de entrada nos procedimentos de cálculo para a correta caracterização do ambiente eletromagnético de uma LT.

O último capítulo, *Conclusões*, apresenta as conclusões alcançadas com o desenvolvimento deste trabalho e propostas de continuidade.

Finalmente, o Apêndice A apresenta uma listagem dos dados de entrada utilizados para o cálculo dos campos elétricos e magnéticos.

2 Campos Elétricos e Magnéticos de Linhas de Transmissão de Energia

2.1 *Introdução*

As fontes de campos e ondas eletromagnéticas podem ser divididas em duas categorias: as naturais e as criadas pelos homens. As fontes naturais podem ser encontradas de diversas formas no meio ambiente, como o campo magnético estático da terra, os campos elétricos criados por nuvens carregadas, as ondas eletromagnéticas geradas por descargas atmosféricas, entre outras fontes. As fontes criadas pelo homem são basicamente as que geram, transmitem e utilizam a energia elétrica e as utilizadas para comunicação através da transmissão sem fio. Dessa forma, todos os equipamentos elétricos e eletrônicos geram campos elétricos e magnéticos.

As diversas fontes de campos eletromagnéticos podem ser classificadas de acordo com a sua frequência, representadas através de um espectro de frequência ou espectro eletromagnético. Os campos elétricos e magnéticos de sistemas de energia, como as Linhas de Transmissão de Energia (LT), são campos de baixa frequência conforme ilustra a Figura 2.1.

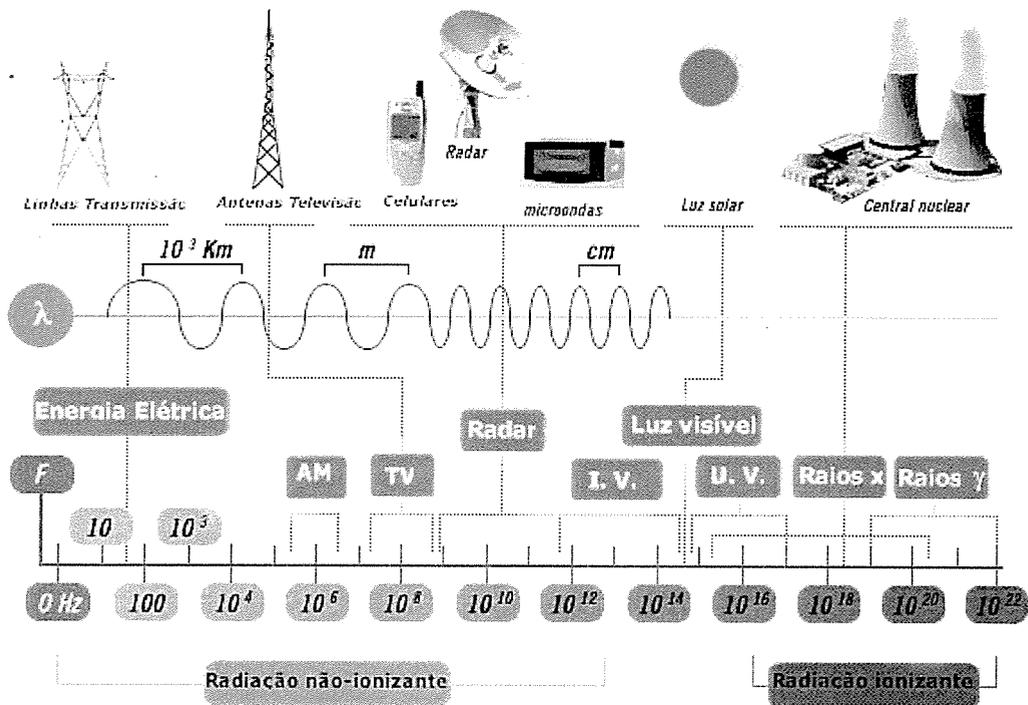


Figura 2.1 – Espectro Eletromagnético

Os campos eletromagnéticos podem ser determinados através de cálculo, pela solução das equações de Maxwell, ou através de medições.

Os campos elétrico e magnético são acoplados, isto é, se um é conhecido, o outro pode ser calculado a partir deste, sendo uma difícil tarefa em alguns casos. Em outras circunstâncias, sob simplificações, eles podem ser determinados como se fossem desacoplados [12]. Este é o caso para os campos próximos de LT, onde a variação lenta com o tempo permite simplificações que desacoplam as equações de Maxwell, possibilitando o cálculo a partir das equações da quase-estática.

2.2 Unidades de Medida

As unidades recomendadas para as grandezas elétricas e magnéticas são as do Sistema Internacional de Unidades (unidades SI) e unidades derivadas.

Algumas unidades utilizadas neste trabalho são listadas a seguir:

Tensão (V):	Volt (V)
Corrente (I):	Ampere (A)
Resistividade (ρ):	Ohm x metro ($\Omega.m$)
Intensidade de campo elétrico (E):	Volts por metro (V/m)
Intensidade de campo magnético (H):	Amperes por metro (A/m)
Densidade de campo elétrico (D):	Coulombs por metro quadrado (C/m^2)
Densidade do fluxo magnético (B):	Tesla (T) ou Gauss (G)

A maioria dos trabalhos técnicos que tratam de campos magnéticos fornece os valores dos campos em Tesla (T) ou Gauss (G). Na realidade, a unidade de intensidade de campo magnético, geralmente representado pela letra "H", é o Ampere/metro (A/m). A unidade de densidade de fluxo magnético, geralmente representada pela letra "B", é o Tesla no Sistema Internacional de Unidades, sendo que alguns países de linha inglesa ainda utilizam a unidade Gauss (1 G = 100 μ T; 1 mG = 0,1 μ T). Apesar de intensidade de campo e densidade de fluxo serem grandezas diferentes, a literatura em geral utiliza indistintamente as duas grandezas referindo-se a elas, indevidamente, como "valores de campo magnético".

No ar (vácuo) a relação entre elas é:

$$B = \mu_0 H;$$

onde $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$ Henry/metro (H/m) é a permeabilidade magnética do vácuo.

2.3 Campos Elétricos e Magnéticos de Linhas de Transmissão

As diferentes características dos campos elétricos e magnéticos, tais como componentes de freqüência, variações temporais, variações espaciais e intensidade requerem um conhecimento prévio das fontes e do ambiente para a definição dos métodos e procedimentos para a caracterização desses campos.

Para as linhas aéreas de transmissão de energia (LT), as fontes principais de campo elétrico e magnético são, respectivamente, as tensões e correntes elétricas (movimento de cargas) provenientes diretamente dos condutores. As frequências apresentadas por sistemas de potência são basicamente as fundamentais (50 ou 60 Hz). As variações das intensidades ao longo do dia ocorrem mais expressivamente para o campo magnético devido à sua dependência com as correntes, que apresentam uma variação considerável nesse período. Para os campos elétricos, associados às tensões, essas variações não são significativas, pelo fato da tensão não apresentar variações consideráveis.

As linhas de transmissão apresentam uma considerável variação das distâncias dos condutores (fontes de campo) ao solo devido às flechas e a variação da topografia. Dessa forma, os campos elétricos e magnéticos nas proximidades do solo sob uma linha de transmissão não serão de mesma intensidade devido à dependência espacial dos campos em relação às fontes.

As tensões e correntes elétricas em cada fase da LT são senoides defasadas no tempo e geometricamente dispostas em diferentes posições. Com isso, em um certo ponto no espaço os componentes dos campos elétricos e magnéticos devido a cada fase apresentam diferentes módulos e fases, que somadas, 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 2.2 [7]. O módulo e a direção do semi-eixo maior da elipse, dado por M na Figura 2.2, indica a intensidade e a direção do campo máximo. Similarmente, o módulo e a direção do semi-eixo menor, dado por m na Figura 2.2, indica a intensidade e a direção do campo mínimo. O campo resultante é determinado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos campos máximo e mínimo, conforme equações (2.1):

$$\begin{aligned} E_R &= \sqrt{E_{Max}^2 + E_{min}^2} \text{ e} \\ H_R &= \sqrt{H_{Max}^2 + H_{min}^2} \end{aligned} \quad (2.1)$$

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. As resultantes E_R e H_R são sempre maiores ou iguais a E_{Max} e H_{Max} . Se o campo for linearmente polarizado, $E_{min} = 0$, $H_{min} = 0$, o campo resultante $E_R = E_{Max}$ e $H_R = H_{Max}$. Para a condição de campo circularmente polarizado, $E_{Max} = E_{min}$, $H_{Max} = H_{min}$ e o campo resultante será 41% maior que o campo máximo [3,4].

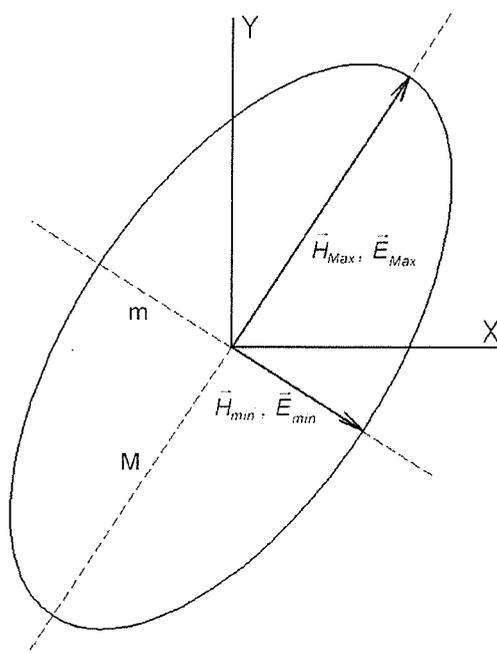


Figura 2.2 – Representação do campo elétrico e magnético através da elipse

Os campos elétricos e magnéticos gerados por uma LT 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 [7], conforme equação 2.2:

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2},$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2},$$
(2.2)

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

Nos cálculos realizados neste trabalho, que considera a LT como uma fonte de duas dimensões, optou-se pelo cálculo do campo resultante através da equação (2.2). Essa escolha é atribuída ao fato do campo resultante ser sempre maior ou igual ao campo máximo, o que dá uma característica conservadora ao cálculo, além da simplicidade de implementação dos procedimentos de cálculo.

Limites de campo elétrico e magnético em função da frequência têm sido recomendados [2] e adotados em vários países. Dessa forma, uma caracterização dos campos elétricos e magnéticos nas vizinhanças de linhas aéreas de transmissão para uma comparação com os níveis recomendados torna-se importante. Essa caracterização pode ser feita durante a fase de projeto da LT e depois que a mesma estiver em operação. Na fase de projeto, os campos são determinados através de cálculos com os dados do projeto ainda em definição, para garantir que os campos gerados não serão superiores aos recomendados por normas. Os valores utilizados geralmente são para a condição máxima de operação, que implicarão em valores resultantes máximos dos campos elétricos e magnéticos. Com a LT em operação, os campos são determinados através de cálculos ou medições, para verificar se os níveis estão dentro dos recomendados pelas normas para renovação da licença de operação, para estudos do compartilhamento da faixa de servidão com outras instalações [16] ou até mesmo para verificar a segurança das pessoas em áreas invadidas. A seguir, são apresentados os procedimentos para medição e cálculo dos campos elétricos e magnéticos adotados neste trabalho.

2.4 Procedimentos de Medição

Algumas normas internacionais definem os procedimentos de medição para a caracterização dos campos elétricos e magnéticos de baixa frequência. A norma IEC 61786:1998 [3] fornece um guia para medição dos valores eficazes de regime permanente de campos elétricos e magnéticos quase-estáticos que

têm componentes de frequência que variam de 15 Hz a 9 kHz. Essa norma identifica os requisitos de especificação de medidores de campo, indica métodos de calibração e orienta na definição de protocolos de medição dos campos elétricos e magnéticos. A norma IEEE Std 644-1994 [4] define os procedimentos específicos para a medição de campos de linhas de transmissão e distribuição (50/60 Hz) em pontos próximos do solo. Descreve as principais características dos instrumentos de medição e os métodos de calibração dos medidores.

No Brasil, não há normas e diretrizes que recomendem os procedimentos de medições de campos elétricos e magnéticos de baixa frequência e nem específicos para linhas de transmissão.

Para uma boa caracterização dos campos elétricos e magnéticos através de medições, deve ser realizada uma definição apropriada dos procedimentos de medição. De acordo com a necessidade específica da medição, várias características dos campos como a variação temporal, variação espacial, componentes de frequência entre outras devem ser avaliadas para que os objetivos sejam atingidos.

Uma vez que os objetivos sejam identificados, deve ser feita uma escolha adequada da instrumentação que será utilizada. Vários tipos de medidores são encontrados para a medição dos campos elétricos e magnéticos. Para medições nas vizinhanças de linhas aéreas de transmissão, os medidores de indução para o campo magnético e de espaço livre para o campo elétrico são amplamente utilizados e recomendados pela literatura [4, 9] e por normas [3, 4]. Por serem portáteis, apresentam boa mobilidade, úteis em medições que requerem o mapeamento do campo.

2.4.1 Medidor de campo magnético

Medidores de campos magnéticos são compostos de duas partes: a sonda ou elemento sensor de campo e o detector, que processa o sinal do sensor e indica o valor do campo magnético em um visor. Alguns equipamentos podem

ser programados para apresentar o valor do campo resultante (r.m.s.) ou de pico.

A sonda ou elemento sensor pode ser de eixo único ou três eixos. Sensores de eixo único requerem a orientação no eixo desejado de medição. Podem ser usados para medir o valor do campo magnético máximo, através da orientação do sensor até que uma leitura máxima seja obtida. Também podem ser utilizados para a medição do campo resultante através da medição dos valores r.m.s. dos três componentes espaciais ortogonais e o cálculo com a aplicação da equação (2.3):

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} . \quad (2.3)$$

Os sensores de três eixos possuem três bobinas circulares com eixos ortogonais que detectam o campo nas três direções do espaço. O campo magnético resultante é também determinado pelo detector através da equação (2.3).

Durante as medições do campo magnético, o sensor pode ser segurado manualmente sem nenhuma perturbação significativa do campo devido à proximidade do operador.

a) Teoria de operação

O princípio de operação do medidor de campo magnético mostrado na Figura 2.3 é baseado na lei de Faraday que prevê que uma tensão V é induzida no terminal de um laço de fio aberto colocado em um campo magnético variável. Especificamente, a tensão é igual ao valor negativo da taxa de variação do fluxo ϕ em relação ao tempo através do laço, conforme a equação (2.4).

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[\int_A \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dA \right] , \quad (2.4)$$

onde: \mathbf{B} é o vetor densidade do fluxo magnético;
 \mathbf{n} é o vetor unitário perpendicular à área do laço;
 dA é um elemento da área.

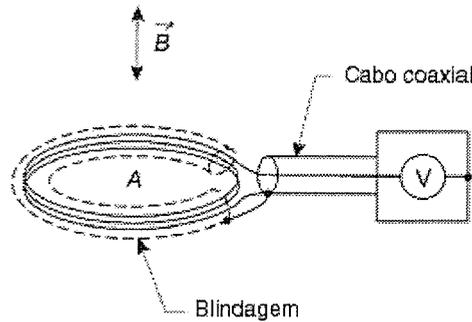


Figura 2.3 – Princípio de funcionamento do medidor de campo magnético [3,4]

Se o campo magnético for livre de harmônicas, como $H = H_0 \text{ sen } \omega t$ e perpendicular à área da sonda, a densidade de fluxo magnético será $B = B_0 \text{ sen } \omega t$. Então:

$$V = -\omega B_0 A \cos \omega t, \quad (2.5)$$

onde a frequência angular ω é igual a $2\pi f$, sendo f a frequência.

Para N voltas do fio no laço, a tensão dada pela equação (2.5) irá se desenvolver em cada volta e a tensão total será $-N\omega B_0 A \cos \omega t$. A equação (2.5) mostra que a sensibilidade aumenta com a área da sonda.

2.4.2 Medidor de campo elétrico

De forma similar aos medidores de campo magnético, os medidores de intensidade de campo elétrico também são compostos de duas partes: a sonda ou elemento sensor de campo e o detector, que processa o sinal da sonda e indica o valor r.m.s. da intensidade do campo elétrico em um visor.

Os sensores também podem ser de eixo único ou três eixos. Para medições de campo elétrico nas proximidades do solo é indicada a utilização do

equipamento na posição vertical [4], pois nessa região o componente vertical é a mais representativa no campo resultante [9]. O campo elétrico resultante também pode ser determinado através da medição dos valores r.m.s. dos três componentes espaciais ortogonais e o cálculo com a aplicação da equação (2.6):

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} . \quad (2.6)$$

Os sensores de três eixos são compostos por três pares de placas paralelas arranjadas ortogonalmente que detectam o campo nas três direções do espaço. O campo elétrico resultante é determinado pelo detector também através da equação (2.6).

Durante as medições de intensidade de campo elétrico, o observador deve ficar distante da sonda para evitar uma perturbação significativa do campo no ponto da medição [3, 4]. São encontrados medidores de espaço livre, projetados para que o visor seja separado do elemento sensor através de uma conexão por cabo de fibra-óptica, minimizando as perturbações introduzidas pelo operador do equipamento [21].

a) Teoria de operação

Medidores de espaço livre determinam a intensidade do campo elétrico medindo a corrente induzida permanente entre as duas partes condutoras (eletrodos) de um sensor isolado eletricamente, quando este é introduzido no campo elétrico.

A Figura 2.4 mostra geometrias do medidor de espaço livre de eixo único. A teoria de operação dos medidores de espaço livre pode ser entendida considerando um corpo condutor descarregado com partes ou eletrodos separados, introduzidos em um campo elétrico uniforme E . A carga induzida em um dos eletrodos é:

$$Q = \int_{S/2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} \, dA \quad (2.7)$$

onde: \mathbf{D} é o vetor densidade de campo elétrico;

\mathbf{n} é um vetor unitário perpendicular à superfície do eletrodo;

dA é um elemento de área na metade do corpo com superfície total S .

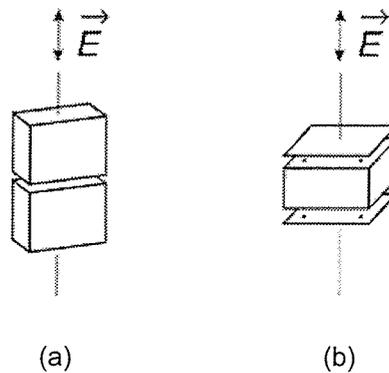


Figura 2.4 – Geometrias de medidores de campo elétrico de espaço livre de eixo único [3,4]

Sensores que usam cubos e placas paralelas, conforme Figura 2.4(b), têm sido empregados. Se a intensidade do campo elétrico tem uma dependência no tempo senoidal, por exemplo $E_0 \sin \omega t$, onde ω é a frequência angular, a carga induzida oscila entre as duas partes, e a corrente é dada por:

$$I = -\frac{dQ}{dt} = k\omega\epsilon_0 E_0 \cos \omega t. \quad (2.8)$$

A constante k pode ser considerada uma constante de medidor de campo e é determinada por calibração.

Definidos os objetivos e a instrumentação, um estudo preliminar no ambiente de medição de interesse pode ser desejável antes das definições dos protocolos finais de medição. Esboços são frequentemente necessários para descrever adequadamente as áreas onde as medições serão feitas.

Todas essas definições são importantes para que os objetivos sejam atingidos e as incertezas das medições minimizadas.

2.5 Procedimentos de Cálculo

As geometrias das linhas aéreas de transmissão de energia podem ser consideradas simplificadas quando a intenção é o cálculo de campos elétricos e magnéticos ao nível do solo.

Por outro lado, devido às suas dimensões e ao seu traçado que geralmente apresenta topografias variadas ao longo do percurso, além de cada vez mais dividir espaço com outras instalações (cercas, redes de distribuição, gasodutos, construções), a determinação de forma precisa dos parâmetros que serão utilizados nos cálculos pode ser uma tarefa difícil e até inviável, levando, na maioria das vezes, a aproximações através de considerações de valores médios.

Neste trabalho, será avaliada a influência dessas variáveis de entrada através de procedimentos de cálculo baseados em equações analíticas, apresentados na literatura de projetos elétricos de linhas de transmissão [5].

2.5.1 Cálculo do campo magnético

Os campos magnéticos de linhas aéreas de transmissão podem ser calculados através de uma modelagem em duas dimensões (2D), assumindo os condutores como linhas paralelas ao plano do solo, conforme mostra a Figura 2.5.

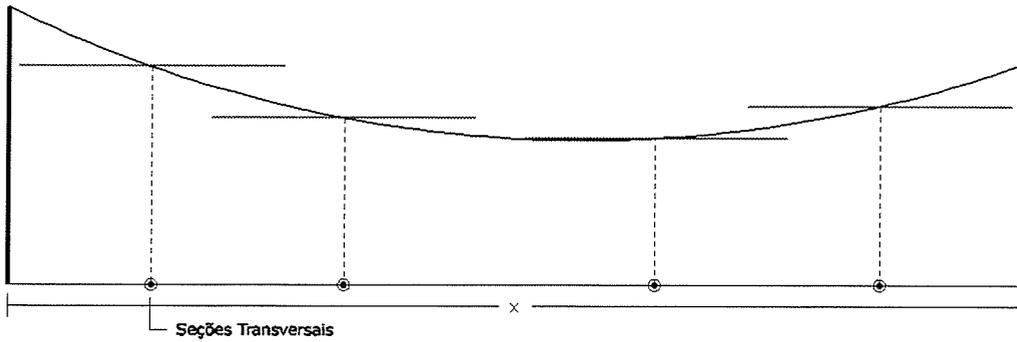


Figura 2.5 – Detalhe da representação dos condutores em cada seção

Considerando um plano cartesiano com o condutor da LT perpendicular ao plano X,Y conforme Figura 2.6, o campo magnético, $H_{j,i}$, em um ponto (X_j, Y_j) a uma distância, $r_{i,j}$, do condutor conduzindo uma corrente I_i tem a amplitude:

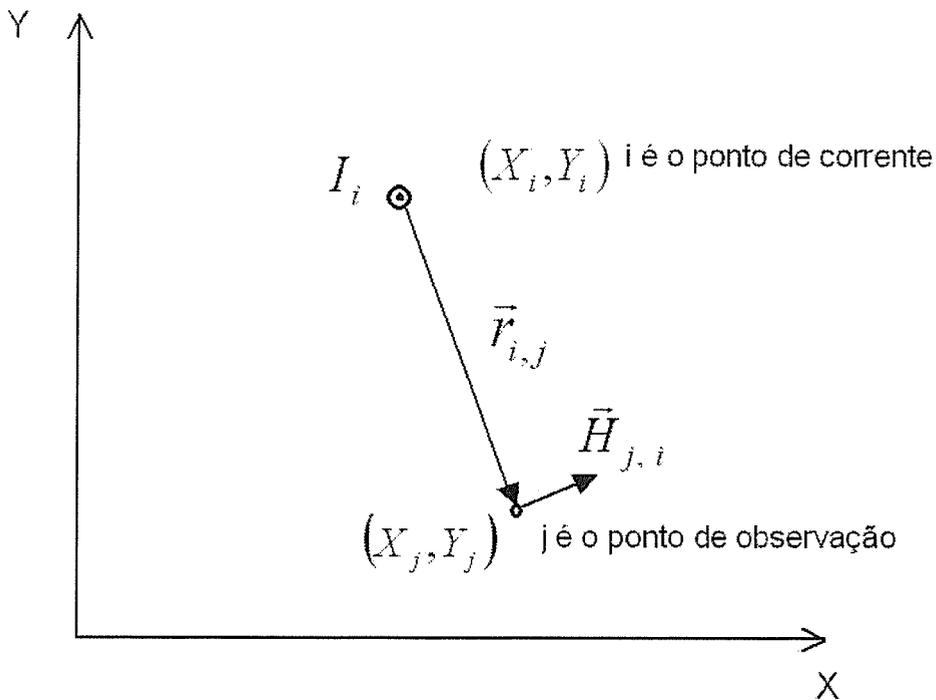


Figura 2.6 – Sistema de coordenadas para cálculo do campo magnético

$$H_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \quad (2.9)$$

Em notação vetorial:

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\phi}_{i,j}, \quad (2.10)$$

onde $\phi_{i,j}$ é o vetor unitário na direção do produto vetorial do elemento de corrente $I_i \cdot dl$ pelo segmento $(\vec{r}_{i,j})$. O vetor unitário é:

$$\vec{\phi}_{i,j} = -\frac{Y_i - Y_j}{r_{i,j}} \vec{u}_x + \frac{X_i - X_j}{r_{i,j}} \vec{u}_y, \quad (2.11)$$

onde \vec{u}_x e \vec{u}_y são os 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 filamentosares i :

$$\vec{H}_j = \sum_i^n \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\phi}_{i,j}. \quad (2.12)$$

A densidade de fluxo magnético é:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (2.13)$$

Os condutores filamentosares para o cálculo do campo magnético ou densidade de fluxo magnético nas proximidades do solo sob uma LT são as correntes dos condutores, as correntes induzidas nos cabos pára-raios e em objetos metálicos sob a LT e as correntes de retorno pelo solo. Um fator de correção é indicado por [5] para considerar a corrente de retorno pelo solo. A adição desse fator à equação (2.12) resulta na equação (2.14):

$$\vec{H}_j = \sum_i \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\phi}_{i,j} - \frac{I_i}{2\pi r'_{i,j}} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{2}{r'_{i,j}} \right)^4 \right] \vec{\phi}'_{i,j}. \quad (2.14)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}, \quad (2.15)$$

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

$$r'_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + \left(y_i + y_j + \frac{2}{\gamma}\right)^2} \quad (2.16)$$

O vetor unitário é:

$$\vec{\phi}'_{i,j} = -\left[\frac{Y_i + Y_j + \frac{2}{\gamma}}{r'_{i,j}}\right]\vec{u}_x + \frac{X_i - X_j}{r'_{i,j}}\vec{u}_y \quad (2.17)$$

O resultado é um valor complexo indicando que o campo magnético não está em fase com a corrente do condutor quando a resistividade do solo é considerada.

A consideração do retorno pelo solo para calcular o campo magnético é significativa para distâncias superiores a 100 metros do centro da LT, sendo a equação (2.12) suficiente para calcular o campo magnético para distâncias inferiores [5].

A contribuição dos cabos pára-raios pode ser considerada desprezível [18], por estarem mais distantes do solo (acima das fases) e terem apenas pequenas correntes induzidas. No procedimento adotado para o cálculo do campo magnético, foram considerados apenas os cabos fase como condutores filamentosos.

Para uma LT 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 2.7, onde a densidade de fluxo magnético devido à corrente no condutor a é:

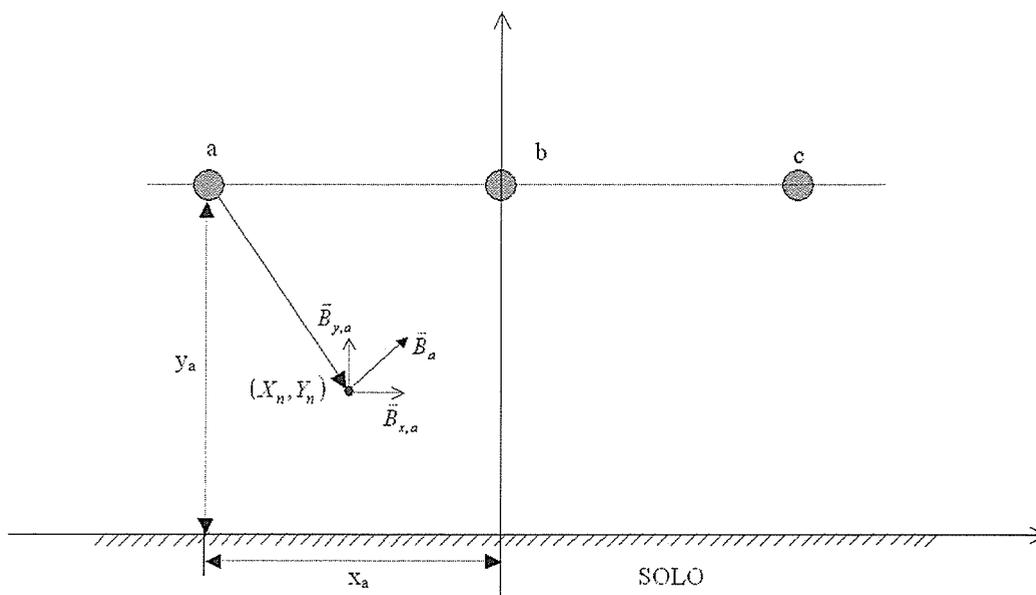


Figura 2.7 – Representação dos condutores da LT para o cálculo da densidade de fluxo magnético em um ponto N.

$$\vec{B}_a = B_{x,a} \vec{u}_x + B_{y,a} \vec{u}_y \quad (2.18)$$

onde:

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

$$B_{x,a} = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} \left\{ \frac{-(Y_n - Y_a)}{[(X_a - X_n)^2 + (Y_a - Y_n)^2]} - \frac{-(Y_n + Y_a)}{[(X_a - X_n)^2 + (Y_a + Y_n)^2]} \right\} \quad (2.19)$$

$$B_{y,a} = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} \left\{ \frac{(X_n - X_a)}{[(X_a - X_n)^2 + (Y_a - Y_n)^2]} - \frac{(X_n + X_a)}{[(X_a - X_n)^2 + (Y_a + Y_n)^2]} \right\} \quad (2.20)$$

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),

$$\begin{aligned} B_x &= B_{x,a} + B_{x,b} + \dots + B_{x,n} \\ B_y &= B_{y,a} + B_{y,b} + \dots + B_{y,n} \end{aligned} \quad (2.21)$$

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:

$$\begin{aligned} B_x &= \sqrt{B_{x,r}^2 + B_{x,i}^2} \text{ e} \\ B_y &= \sqrt{B_{y,r}^2 + B_{y,i}^2} . \end{aligned} \quad (2.22)$$

A densidade de fluxo magnético resultante total é dada por:

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (2.23)$$

2.5.2 Cálculo do campo elétrico

Dado um arranjo arbitrário de condutores com potenciais quaisquer, a situação de equilíbrio consiste numa distribuição de cargas na superfície dos condutores. O procedimento utilizado [4,22] consiste na substituição dessa distribuição real por n linhas de cargas fictícias colocadas no interior dos condutores. No caso do cálculo do campo elétrico de uma LT, onde há uma simplicidade da geometria, pode-se considerar uma única linha de carga [5], o que simplifica os cálculos. O solo é assumido como um condutor perfeito, pois o tempo para que as cargas se redistribuam na sua superfície, que é o tempo de relaxação ($\tau = \rho \cdot \epsilon$), é extremamente pequeno (0.1 a 100ns) comparado com o período do sistema de potência.

Os valores das cargas, matriz $[Q]$, são obtidos através do produto da matriz $[\phi_c]$ dos potenciais nos condutores pelo inverso da matriz $[P]$ dos coeficientes do potencial de Maxwell, dado por:

$$[Q] = [P]^{-1} [\phi_c] \quad (2.24)$$

Para uma LT composta de condutores paralelos ($i = a, b, \dots, n$) sobre um solo perfeitamente plano, conforme a Figura 2.8, os elementos da matriz $[P]$ são dados pelas equações:

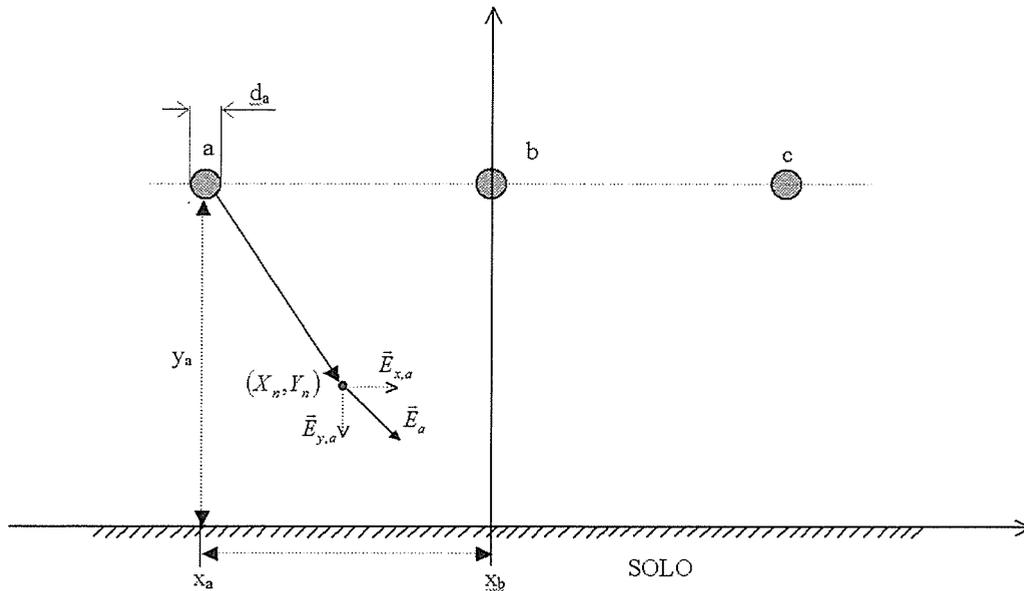


Figura 2.8 – Representação dos condutores da LT para o cálculo do campo elétrico em um ponto N.

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left(\frac{4Y_a}{d_a} \right) e \quad (2.25)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left(\frac{\left((X_a - X_b)^2 + (Y_a + Y_b)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\left((X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (2.26)$$

onde : Y é a distância vertical do condutor ao solo, X é a posição horizontal do condutor em relação ao eixo da LT e d o diâmetro do condutor para as fases (a, b, ..). Para um feixe de condutores é conveniente considerar o diâmetro equivalente dado por:

$$d_{eq} = D \cdot n \sqrt{\frac{n \cdot d}{D}}, \quad (2.27)$$

onde : D é o diâmetro do feixe, n o nº de subcondutores e d o diâmetro dos subcondutores.

Determinadas as cargas em cada condutor pela solução da equação (2.24), pode-se calcular 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:

$$\vec{E}_a = E_{x,a} \vec{u}_x + E_{y,a} \vec{u}_y \quad (2.28)$$

onde:

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

$$E_{x,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(X_n - X_a)}{2\pi\epsilon_0 [(X_a - X_n)^2 + (Y_a - Y_n)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(X_n - X_a)}{2\pi\epsilon [(X_a - X_n)^2 + (Y_a + Y_n)^2]} \quad (2.29)$$

$$E_{y,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(Y_n - Y_a)}{2\pi\epsilon_0 [(X_a - X_n)^2 + (Y_a - Y_n)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(Y_n + Y_a)}{2\pi\epsilon [(X_a - X_n)^2 + (Y_a + Y_n)^2]} \quad (2.30)$$

As componentes horizontal e vertical, E_x e E_y , do campo elétrico, são calculadas pela somatória de todas as contribuições de todos os condutores (a, b, ..., n):

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x,a} + E_{x,b} + \dots + E_{x,n} \\ E_y &= E_{y,a} + E_{y,b} + \dots + E_{y,n} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Cada uma dessas componentes é um fasor, expresso pelas partes real e imaginária, e o módulo do campo elétrico resultante de cada componente é dado por:

$$\begin{aligned} E_x &= \sqrt{E_{x,r}^2 + E_{x,i}^2} \\ E_y &= \sqrt{E_{y,r}^2 + E_{y,i}^2} \end{aligned} \tag{2.32}$$

O campo elétrico resultante total é dado por:

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \tag{2.33}$$

3 Caracterização do Ambiente Eletromagnético de uma Linha de Transmissão de Energia de 500 kV

3.1 Introdução

Para caracterização do ambiente eletromagnético através da aplicação dos procedimentos de medição e cálculo abordados no capítulo anterior, foi selecionado um vão real de uma Linha de Transmissão de Energia (LT). Para escolha do vão, foram observados aspectos que poderiam influenciar na determinação dos campos elétricos e magnéticos, tais como: variação da topografia do vão, presença de árvores, vegetação de pequeno porte, cercas e redes de distribuição.

O vão escolhido foi da LT Neves 1 – Vespasiano 2 de 500 kV, entre as estruturas 51 e 52 de propriedade da CEMIG, localizado no município de Vespasiano, Minas Gerais. O vão possui as características consideradas importantes para uma análise mais detalhada dos procedimentos de cálculo e medição dos campos.

3.2 Levantamento dos Dados do Vão

As características do vão escolhido foram determinadas através de um levantamento de campo detalhado, com utilização de equipamentos de precisão (teodolito), onde foram obtidas todas as distâncias consideradas relevantes e que poderiam influenciar na determinação das intensidades dos campos elétricos e magnéticos. As demais características da LT em estudo foram obtidas dos dados de projeto.

A área do vão escolhido é compreendida pelos limites da faixa de servidão (35 metros para cada lado do eixo) e pelas estruturas 51 e 52 acrescidas de 10 metros para os vãos adjacentes, totalizando 305 metros de comprimento. O levantamento topográfico dessa área foi realizado através da obtenção de 62

seções de perfil topográfico transversais ao sentido longitudinal da LT, espaçadas de 5 metros. Para cada seção transversal, os pontos foram determinados para distâncias de 1 metro.

Também foram determinadas as alturas cabo-solo das três fases em cada perfil, distâncias entre fases, posição e altura das árvores, cercas e rede de distribuição presentes no vão. Durante as medições das alturas cabo-solo, foram determinadas as correntes e a temperatura ambiente. Essas grandezas não apresentaram variações consideráveis durante as medições de campo elétrico e magnético.

A Figura 3.1 mostra esquematicamente a área do vão avaliada, bem como os obstáculos existentes. A Figura 3.2 apresenta os pontos levantados do perfil topográfico e a localização dos cabos da LT, determinados a partir da medição das alturas cabo-solo. As principais características do vão estudado são apresentadas na tabela 3.1.

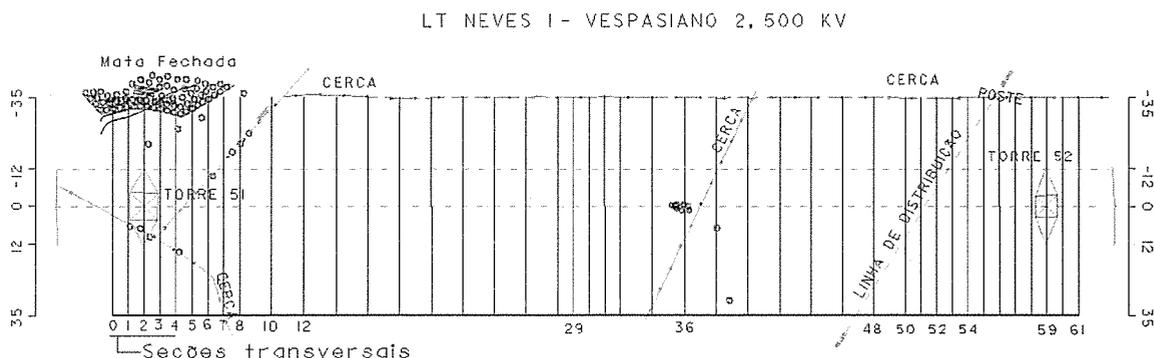


Figura 3.1 – Características do vão real escolhido para caracterização do ambiente eletromagnético.

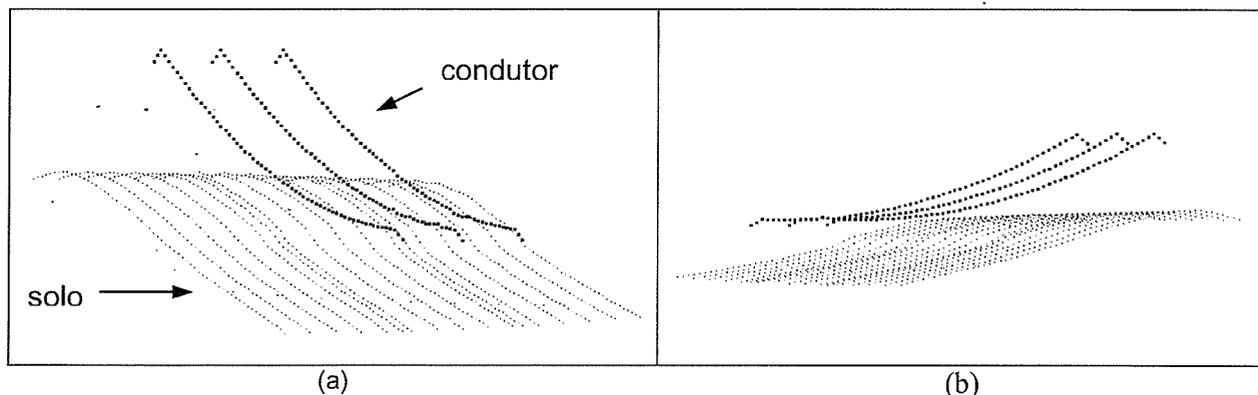


Figura 3.2 - Perfil topográfico do vão escolhido.

Tabela 3.1 – Principais características do vão estudado.

LT Neves 1 – Vespasiano 2, 500kV		
	Tensão de operação média (kV):	545 *
	Corrente de operação média (A):	650 *
	Vão:	T51 – T52
	Comprimento vão (m):	285
	Configuração:	Horizontal
	Altura cabo-solo mínima (m):	10,86
	Altura cabo-solo máxima (m):	25,26
	Nº Circuitos:	1
	Nº Fases:	3
	Distância entre fases (m):	12
	Nº Condutores/Fase:	3
	Espaçamento entre condutores (m):	0,457
Largura da faixa servidão (m):	70	
Condutor:	Ruddy (900 MCM)	
Diâmetro do condutor (m):	0,02874	

* média dos valores medidos na SE Vespasiano 2 no período das medições dos campos elétricos e magnéticos.

Os dados e considerações sobre os valores de corrente (carregamento) e tensão da LT são apresentados nas considerações das medições conforme itens 3.3.1 (a) e (b), apresentados a seguir.

3.3 Determinação dos valores de campos elétricos e magnéticos

A determinação dos campos elétricos e magnéticos no vão escolhido foi feita através de medições e cálculos.

3.3.1 Medições dos campos elétricos e magnéticos

Os procedimentos utilizados para as medições dos campos elétricos e magnéticos seguiram as recomendações da norma IEC 61786:1998 [3], 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 elaboração de um protocolo de medição de acordo com os objetivos específicos e as recomendações da norma IEEE Std 644-1994 [4], referenciada pela primeira como procedimentos específicos para linhas aéreas de transmissão.

Com o conhecimento das características geométricas do vão, e com o propósito de comparar os valores medidos e calculados dos campos elétricos e magnéticos sob as várias condições de interferências e influências existentes ao longo de uma LT, foi realizado um mapeamento do campo elétrico e magnético em todo o vão. Foram escolhidas 40 seções transversais ao sentido longitudinal da LT, observando os parâmetros que poderiam provocar influências nos valores obtidos, como: variação da topografia, presença das estruturas, cercas, árvores, maior e menor altura cabo-solo. Em cada seção as medições foram realizadas em pontos espaçados de 1 metro, totalizando 71 pontos de medição por seção. As medições foram realizadas a 1 metro do solo conforme recomenda [4]. Para a medição do campo elétrico, o operador deve ficar no mínimo a 2,5 metros de distância, uma vez que a sua presença altera os valores de campo [3,4].

O equipamento utilizado foi um sistema analisador de campo, composto por uma unidade básica para configuração e armazenamento dos dados e sensores de campo elétrico e magnético [21]. Para medição de campo

magnético, foi utilizado um sensor com 3 bobinas dispostas ortogonalmente. Para medição de campo elétrico, foi utilizado um sensor formado por um cubo, constituído por três pares de placas paralelas também arranjadas ortogonalmente, permitindo assim a medição do campo nas três direções do espaço (medição isotrópica). O equipamento utilizado e os sensores são mostrados na Figura 3.3.

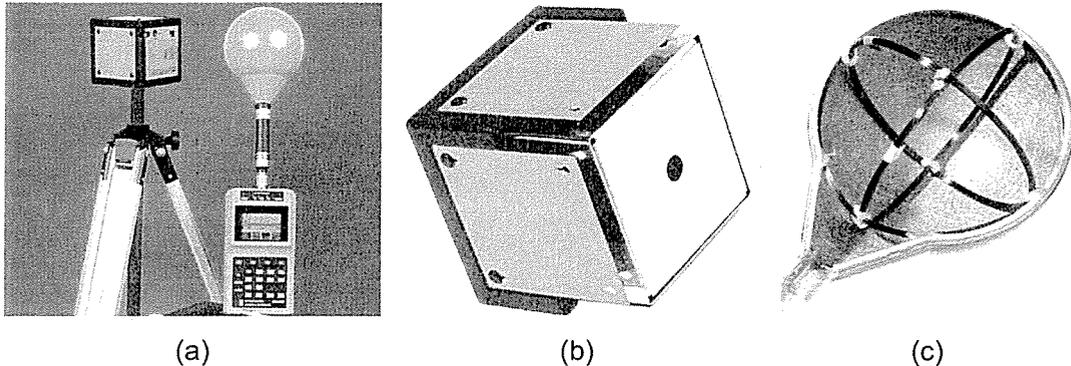


Figura 3.3 – (a) Sistema analisador de campo – (b) sensor de campo elétrico – (c) sensor de campo magnético

O instrumento possui filtros seletivos, o que possibilita a medição dos campos numa faixa de frequência de 5 Hz a 32 kHz. Nas medições realizadas, foi selecionada apenas a frequência de 60Hz. 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 (apenas em medidas isotrópicas). Para a medição do campo elétrico o equipamento possui um *link ótico*, composto por conversores eletro-óticos e uma fibra ótica que liga o sensor de campo à unidade básica (detector), possibilitando que seja mantida uma distância entre o operador e o sensor, evitando a influência do mesmo nos valores de campo elétrico medido, conforme os procedimentos de medição [3].

De acordo com o manual de operação do equipamento utilizado [21], para as configurações escolhidas nas medições, o erro típico para a densidade de fluxo magnético é menor que $3\% \pm 1\eta T$ e para o campo elétrico é menor que $5\% \pm 1 V/m$, incluindo todos os erros parciais (absoluto, resposta em frequência, isotropia e desvio de temperatura).

O equipamento tem a capacidade de armazenamento de 10.000 pontos de medição e os dados são transferidos para o computador através do *link ótico* com a utilização de *software* específico. Os dados são organizados por separadores, facilitando a conversão em planilhas. Para cada ponto de medição o equipamento armazena a posição (x, y e z), o modo de detecção (r.m.s ou pico), direção da medição (x, y, z ou isotrópica), filtro de frequência utilizado, data, horário, valor do campo e uma pré-consistência da validação da medição.

Para que a localização dos pontos de medição fosse a mesma onde foram executados os levantamentos topográficos, piquetes foram instalados no limite da faixa de servidão e no eixo durante o levantamento, e duas trenas métricas eram estendidas entre os piquetes durante a medição, conforme mostra a Figura 3.4.



Figura 3.4 – Detalhe dos piquetes utilizados e o eixo perpendicular a LT marcado pelas trenas métricas.

a) **Considerações sobre as medições do campo magnético**

A caracterização dos campos magnéticos foi feita com a medição da densidade de fluxo magnético, B , medida em μT .

Devido à grande variação da carga (corrente) ao longo do dia em sistemas de energia e a dependência direta do campo magnético com a corrente, foram observadas curvas de carga da LT em estudo para a determinação de um

período de medição onde essa variação fosse minimizada. A Figura 3.5 apresenta uma curva de carga típica para a LT e a curva de carga no horário das medições. O período de menor variação encontrado foi no período das 09:00 às 16:00 h. As medições de campo magnético foram realizadas nesse período.

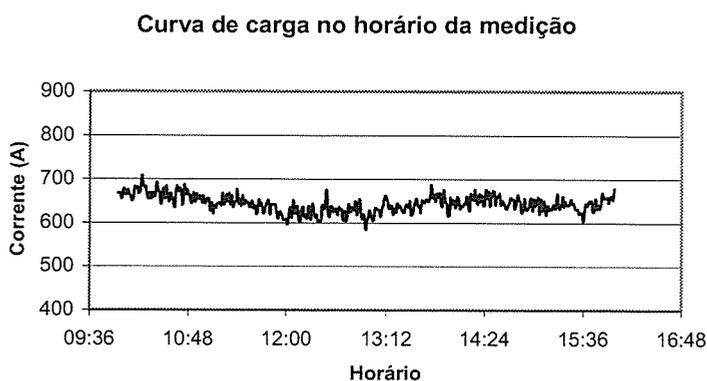
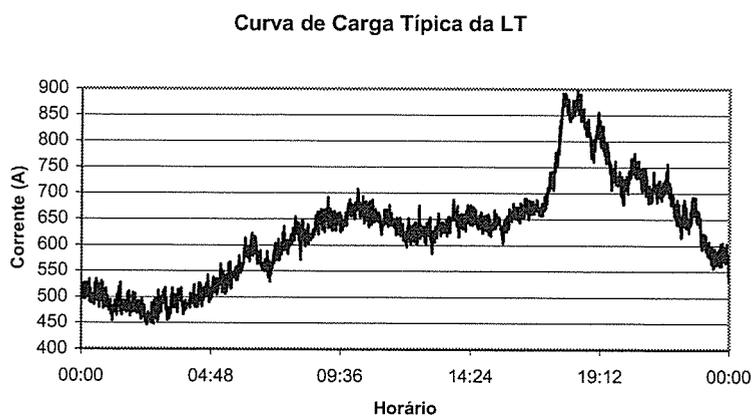


Figura 3.5 – Curva de carga típica da LT (a) e a curva de carga no horário da medição (b)

Durante a realização das medições, o horário de cada ponto medido foi armazenado pelo equipamento. O relógio do equipamento de medição foi acertado com o horário do sistema de armazenamento de dados da subestação (SE), para facilitar a obtenção dessas correntes durante a simulação.

A Figura 3.6 (a, b e c) mostra as medições de campo magnético em uma seção transversal próxima à estrutura 51 e detalhes dos objetos como cercas, árvores dentro da faixa de servidão.

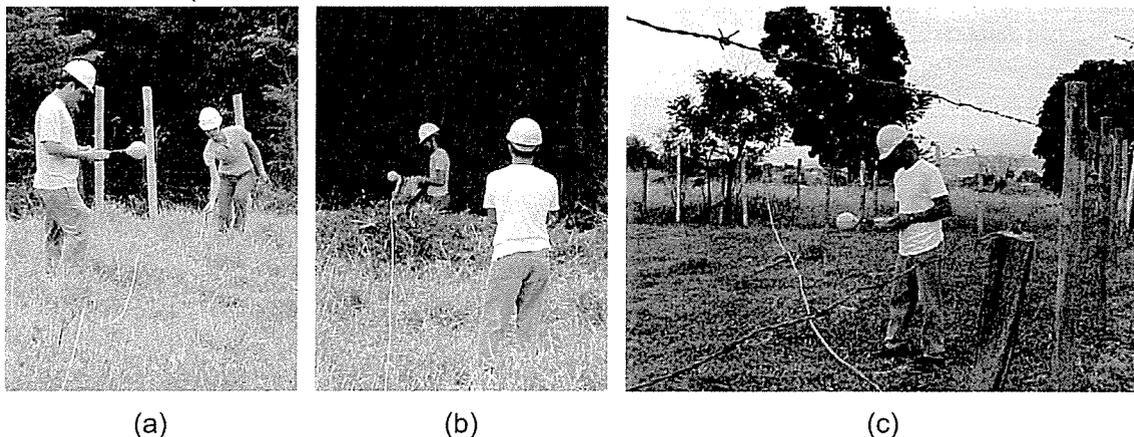


Figura 3.6 – Medições de campo magnético – detalhes dos objetos dentro da faixa de servidão

b) Considerações sobre as medições do campo elétrico

Os valores de campo elétrico foram medidos em kV/m.

Diferentemente da corrente, a variação de tensão da LT ao longo do dia é muito pequena conforme observado na Figura 3.7, que apresenta a curva de tensão característica da LT. Como para a densidade de fluxo magnético, os horários de cada ponto medido foram armazenados pelo equipamento.

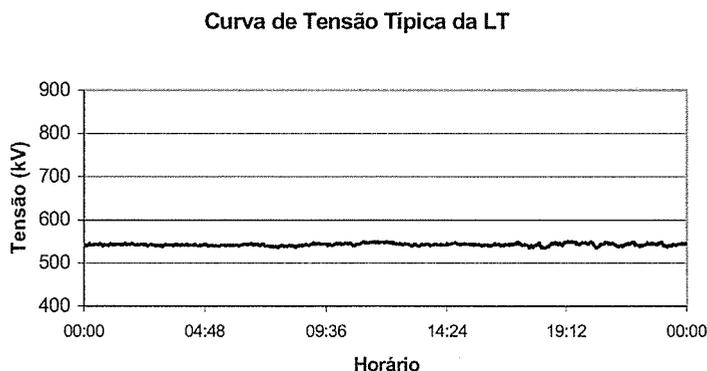


Figura 3.7 – Curva de tensão típica da LT

Conforme os procedimentos de medição adotados [3,4], a medição do campo elétrico deve ser feita com o operador a uma distância de no mínimo 2,5 metros. Para isso foi utilizado um cabo de fibra ótica e o cubo medidor foi posicionado sobre um tripé de madeira ajustado para 1 metro de altura do solo.

A Figura 3.8 (a e b) mostra as medições de campo elétrico em uma seção transversal próxima à estrutura 51 e detalhes dos objetos como cercas, árvores dentro da faixa de servidão e os cuidados como a utilização do tripé e fibra ótica para que o operador não influencie nas medidas.

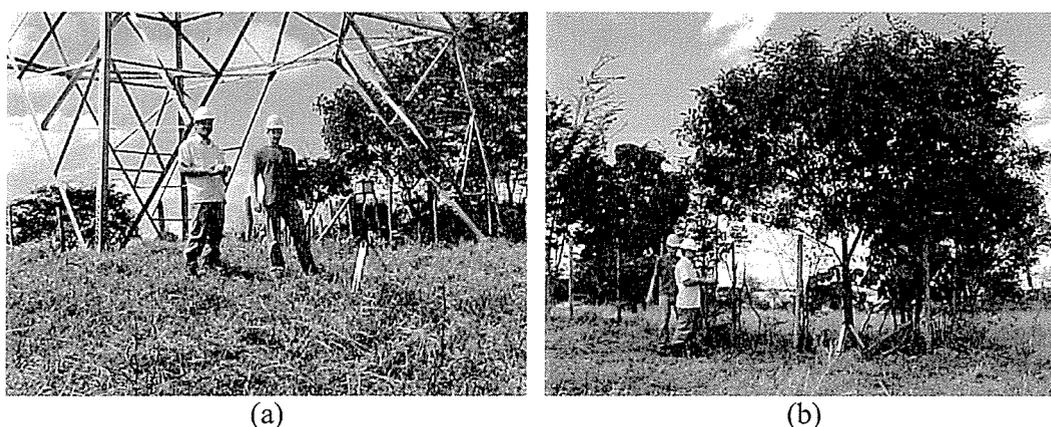


Figura 3.8 – Medições de campo elétrico – detalhe para os obstáculos na faixa de servidão e cuidados para evitar a influência do operador nas medidas.

3.4 Cálculo dos Campos Elétricos e Magnéticos

Para as simulações do campo elétrico e da densidade de fluxo magnético, os procedimentos de cálculo apresentados no Capítulo 2, item 2.5, foram implementados em um programa computacional utilizando o Matlab® [24].

3.4.1 Considerações sobre as simulações

Neste trabalho, para o cálculo do campo elétrico e da densidade de fluxo magnético de cada seção transversal, foram consideradas as linhas de carga e corrente como retas paralelas ao solo, conforme mostra a Figura 3.9.

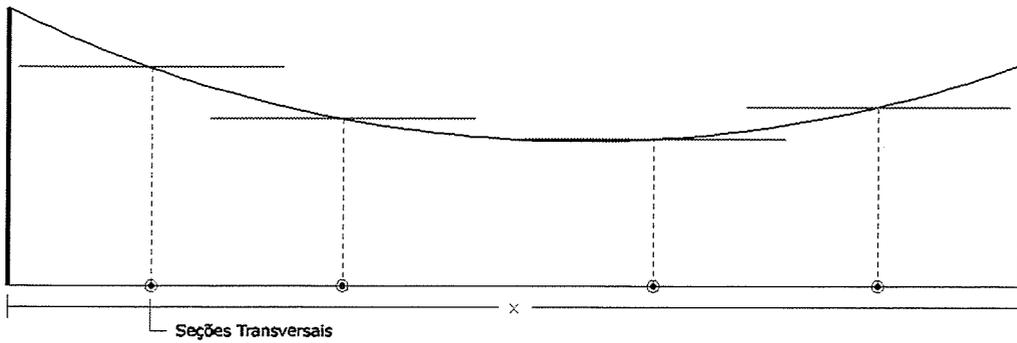


Figura 3.9 – Detalhe da representação dos condutores em cada seção

Para cada seção transversal, foram consideradas a variação da topografia e a posição real dos condutores de cada fase. Os campos foram calculados para pontos a 1 metro do solo. A Figura 3.10 mostra detalhes das distâncias consideradas para cada seção transversal.

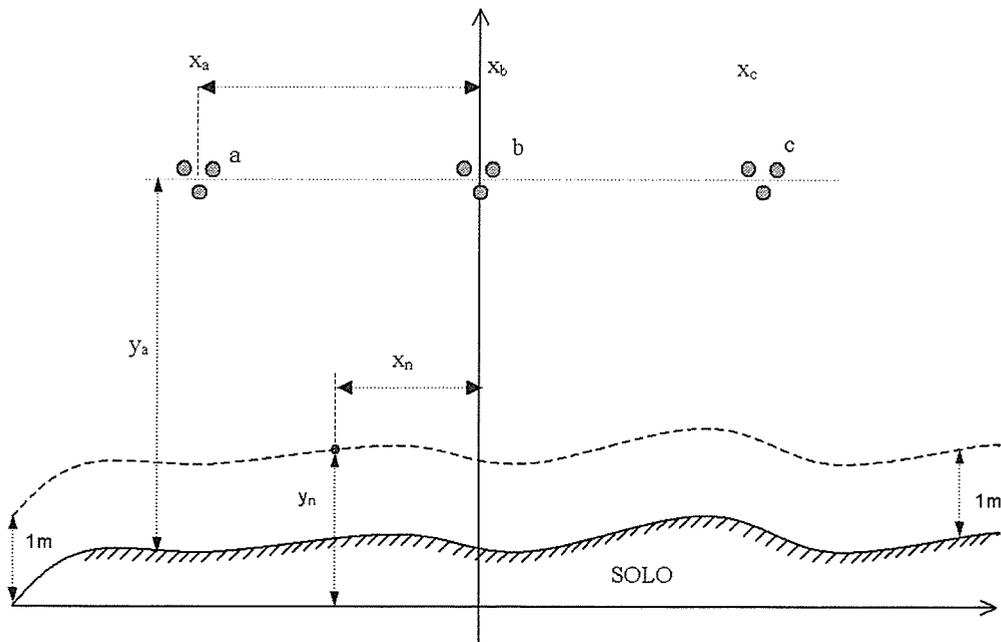


Figura 3.10 – Detalhes das distâncias consideradas no cálculo

Os obstáculos sob a LT não foram considerados nos procedimentos de cálculo.

Para o cálculo da densidade de fluxo magnético, foi implementado o fator de correção para considerar a corrente de retorno pelo solo e efetuado o cálculo de uma seção transversal para verificação da influência do desequilíbrio de corrente típico da LT. As diferenças entre os valores calculados considerando a corrente de retorno e sem considerar são desprezíveis para os campos na faixa de servidão.

3.4.2 Variáveis de Entrada

As variáveis de entrada para o procedimento de cálculo adotado são as distâncias entre os condutores e o solo, distâncias entre as fases, diâmetro dos condutores, tensão para o cálculo do campo elétrico e corrente para o campo magnético. Os dados de entrada utilizados nas simulações são apresentados no Apêndice A.

As geometrias utilizadas nas simulações foram obtidas do levantamento de campo realizado no vão conforme descrito no item 3.2, “Levantamento dos dados do vão”, onde todas as distâncias relacionadas para cada seção transversal foram determinadas. Os dados dos condutores e espaçamento do feixe foram obtidos dos dados de projeto da LT.

Os valores de corrente e tensão da LT utilizados para os cálculos da densidade de fluxo magnético e do campo elétrico, respectivamente, foram obtidos das medições armazenadas pelo sistema de controle da subestação (SE) de Vespasiano 2. O sistema armazena os valores para intervalos de 1 minuto. O relógio do equipamento de medição foi acertado com o horário do sistema da SE. As correntes e tensões armazenadas pelo sistema são os valores para a fase central (B). O desequilíbrio de corrente para a LT é menor que 2% e o de tensão fica abaixo de 1%.

Os valores de tensão e corrente utilizados para cálculo de cada perfil transversal foi a média dos valores durante a medição do perfil. A maior diferença entre os valores de corrente, obtidos na subestação (SE), durante a medição de cada perfil transversal, e o valor médio utilizado no cálculo foi de

4%. Para o campo elétrico devido à estabilidade da curva de tensão, essas diferenças foram menores do que para o campo magnético.

Com a finalidade de evitar erros devido ao grande número de dados envolvidos nos cálculos dos campos elétricos e magnéticos de todas as seções transversais do vão em estudo, os dados foram organizados em planilhas do Excel[®]. Os dados foram submetidos ao programa de cálculo desenvolvido neste trabalho através de uma macro do Excel[®] e os resultados retornados automaticamente. A comunicação entre os dois *softwares* foi feita através de ferramenta disponível no Matlab[®].

4 Análise dos Resultados das Medições e Cálculos

4.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos valores de campo elétrico e da densidade de fluxo magnético da caracterização da LT de 500 kV realizada através de medições e cálculos, conforme descrito no capítulo 3. Também é apresentada uma comparação entre os valores medidos e calculados através dos perfis transversais para algumas regiões do vão.

4.2 Resultados das medições e cálculos

Os resultados das medições e simulações são apresentados através de gráficos, onde são mostradas as principais características dos campos elétricos e magnéticos no vão em estudo. As medições e simulações de campo elétrico e da densidade de fluxo magnético foram feitas em 40 perfis transversais de 71 pontos cada, espaçados de 1 metro, totalizando 2840 pontos de medição para cada grandeza.

Os valores de campo elétrico e da densidade de fluxo magnético medidos no vão em estudo são apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2.

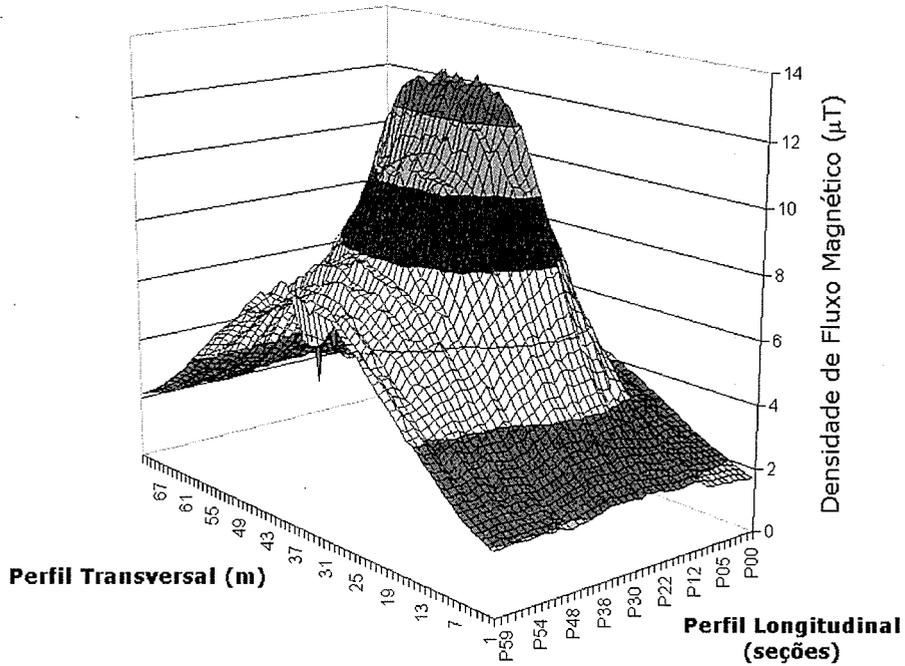
Densidade de Fluxo Magnético no vo - valores medidos

Figura 4.1 – Valores medidos de densidade de fluxo magnético no vo

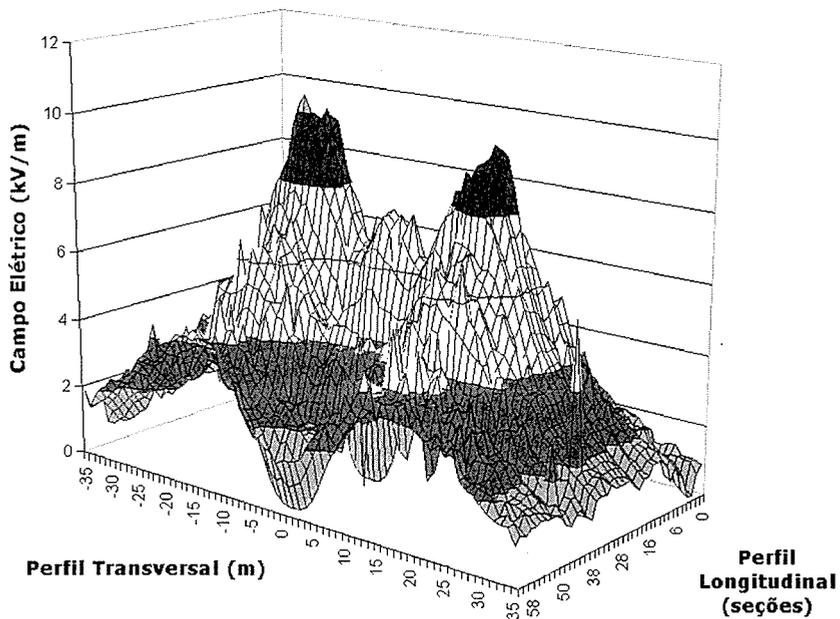
Campo Elétrico no vo - valores medidos

Figura 4.2 – Valores medidos de campo elétrico no vão

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os perfis longitudinais da densidade de fluxo magnético e do campo elétrico medidos no eixo e nos limites da faixa de servidão da LT, conforme indicado na Figura 4.3.

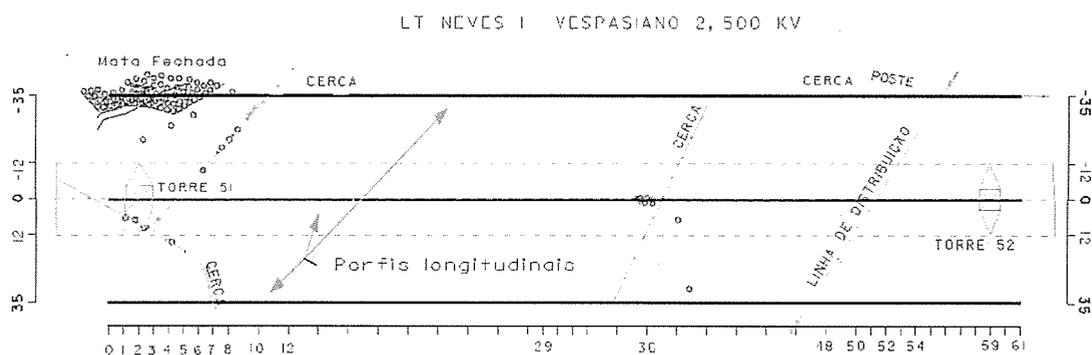


Figura 4.3 – Detalhe do posicionamento dos perfis longitudinais

Perfil Longitudinal da Densidade de Fluxo Magnético

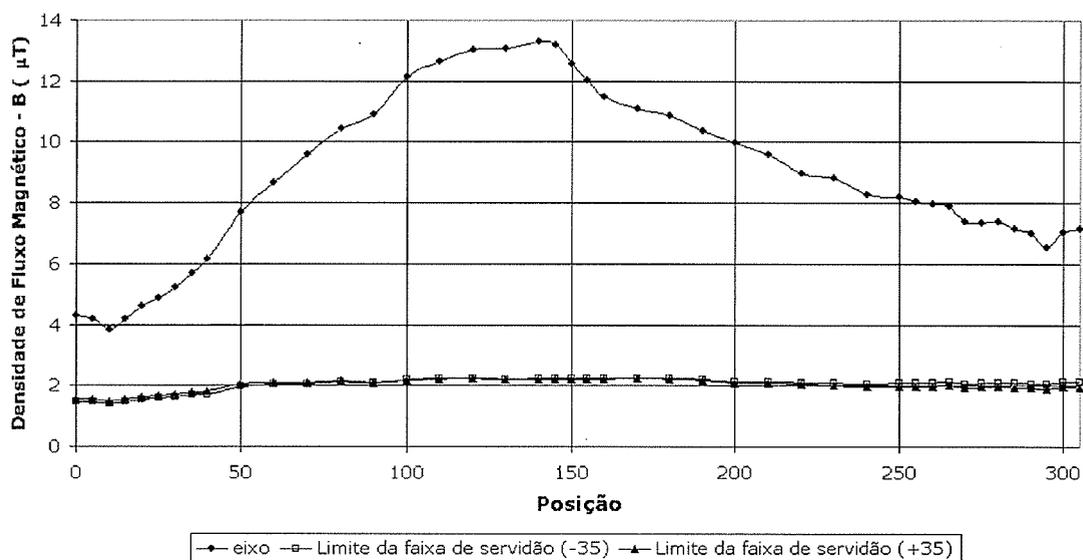


Figura 4.4 – Perfil longitudinal da densidade de fluxo magnético medido nos limites da faixa e eixo da LT

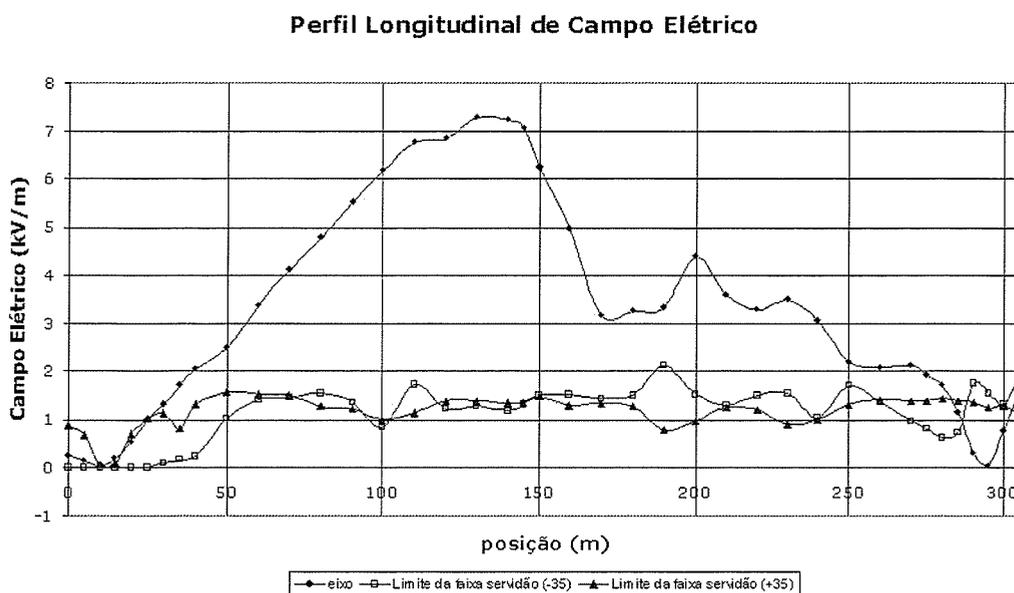


Figura 4.5 – Perfil longitudinal do campo elétrico medido nos limites da faixa e eixo da LT

Os valores de campo elétrico e magnético variam significativamente ao longo do eixo da LT, devido à variação da altura cabo-solo, apresentando os valores máximos na região de menor altura dos condutores fase, conforme indicado na Figura 3.2. No entanto, os campos elétrico e magnético no limite da faixa de servidão da LT não sofrem grande influência das alturas cabo-solo, tendendo a valores uniformes. Os perfis longitudinais de campo elétrico nos limites da faixa de servidão apresentam variações irregulares que podem ser atribuídas à presença dos obstáculos existentes nos pontos de medição. A vegetação, além de outros obstáculos como cercas, árvores, estruturas da LT e rede de distribuição afetam significativamente a medição do campo elétrico, mas não têm influência nos valores de campo magnético.

Nos limites da faixa de servidão da LT, a densidade de fluxo magnético permaneceu praticamente uniforme com valores de aproximadamente $2 \mu\text{T}$ e o valor do campo elétrico variou em torno de $1,4 \text{ kV/m}$.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os valores calculados para a densidade de fluxo magnético e para o campo elétrico do vão em estudo. Também são apresentados através das Figuras 4.8 e 4.9 os perfis longitudinais calculados

da densidade de fluxo magnético e do campo elétrico no eixo e nos limites da faixa de servidão da LT.

Densidade de Fluxo Magnético no vão - valores calculados

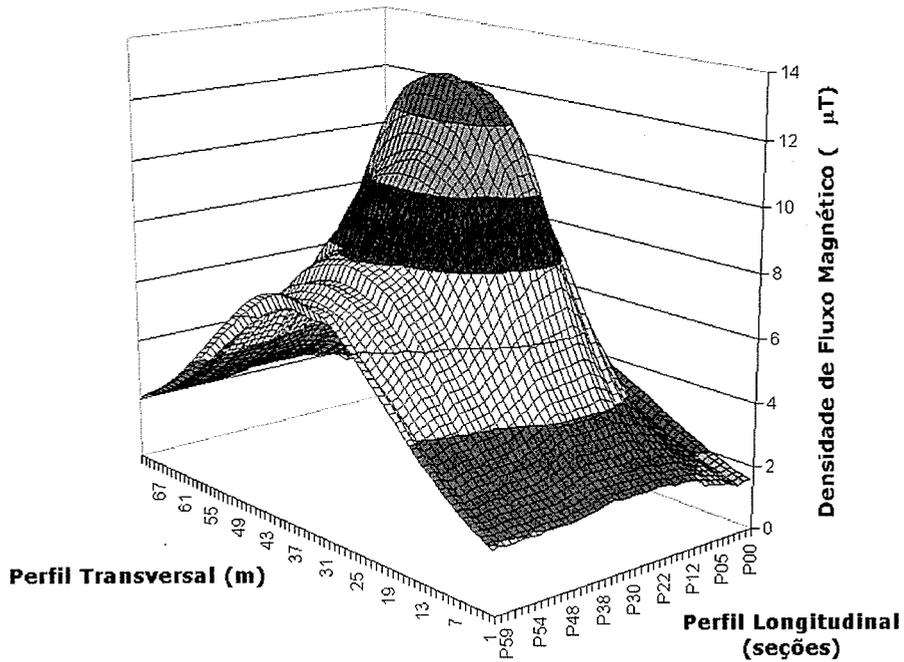


Figura 4.6 – Valores calculados da densidade de fluxo magnético no vão

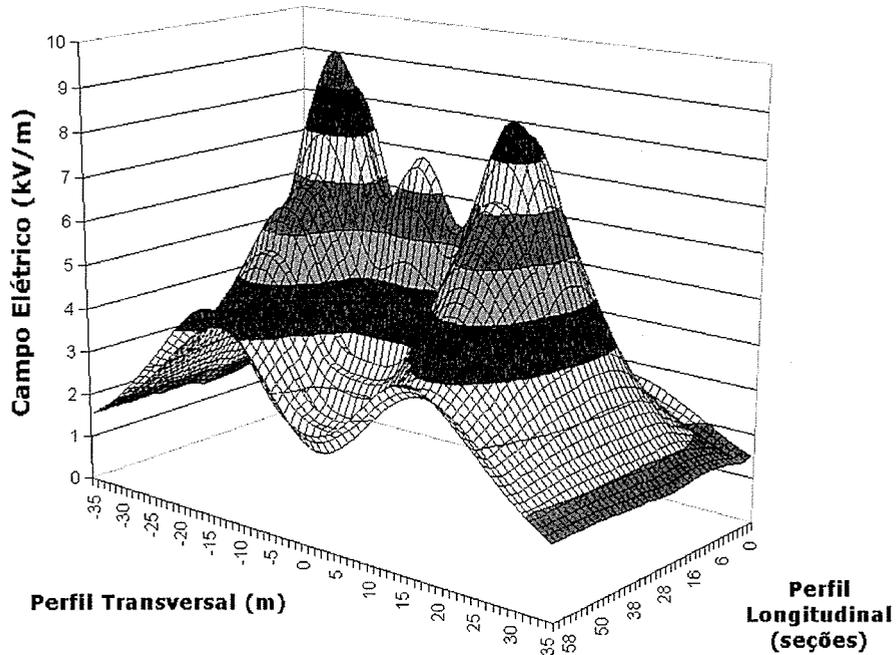
Campo Elétrico no vão - valores calculados

Figura 4.7 – Valores calculados de campo elétrico no vão

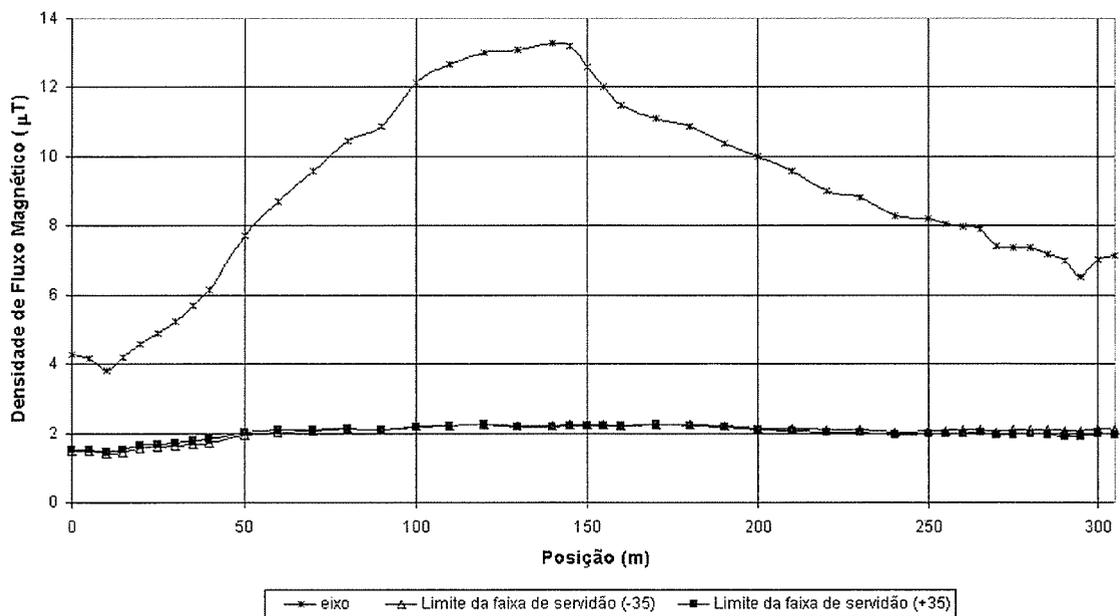
Perfil Longitudinal da Densidade de Fluxo Magnético

Figura 4.8 – Perfil longitudinal da Densidade de Fluxo Magnético – calculado

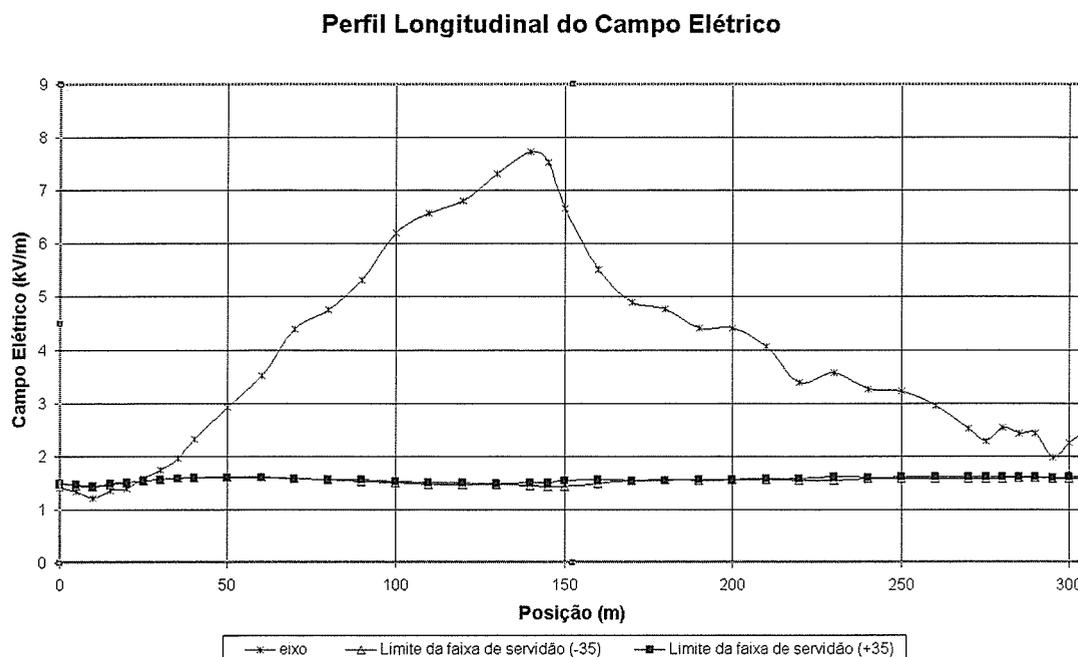


Figura 4.9 – Perfil longitudinal do campo elétrico – calculado

4.3 Análise dos resultados

As comparações entre os valores medidos e calculados foram feitas através dos perfis transversais de campo elétrico e da densidade de fluxo magnético para cada seção do vão em estudo. Foram analisadas as comparações dos resultados de todas as seções transversais do vão e são apresentadas as comparações de algumas seções divididas por categorias como regiões com a presença de obstáculos, menor altura cabo solo e maior inclinação dos cabos condutores. A seguir, são apresentados e analisados os perfis transversais de campo elétrico e da densidade de fluxo magnético dessas seções.

4.3.1 Regiões com presença de obstáculos

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os gráficos dos perfis transversais de campo elétrico e da densidade de fluxo magnético da seção 2, localizada no eixo da estrutura 51. Além da estrutura, nesse eixo há a presença de cercas, árvores de pequeno porte e uma mata fechada em uma das extremidades, conforme mostra a Figura 4.10.

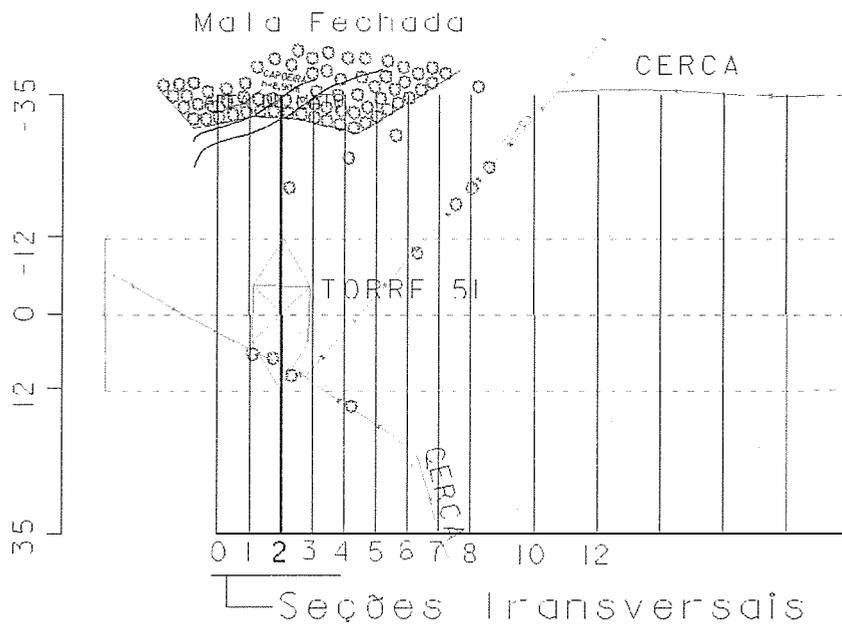


Figura 4.10 – Detalhe dos obstáculos nas proximidades da seção 2.

Perfil Transversal de Campo Elétrico

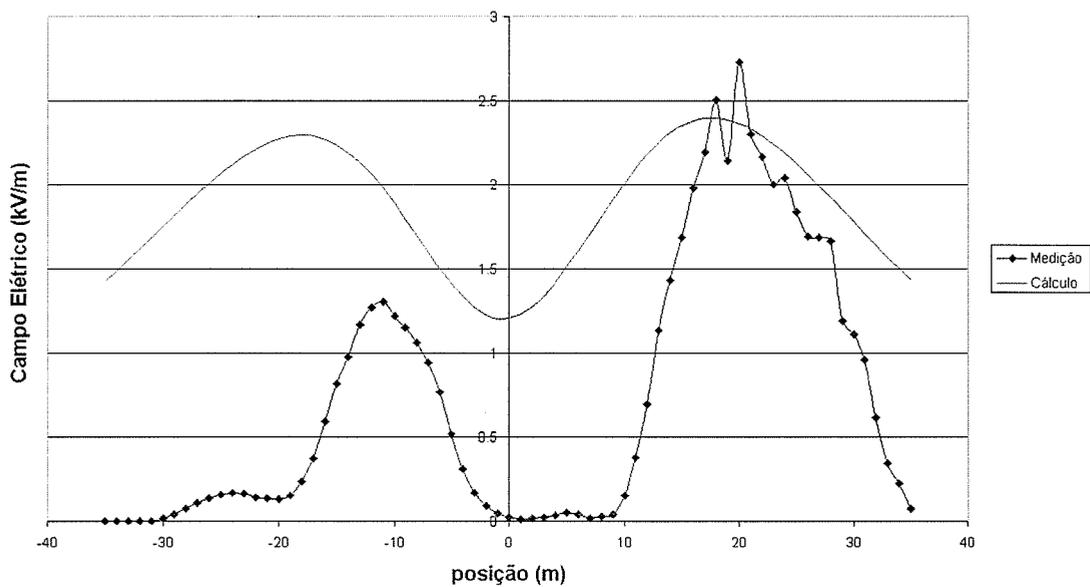


Figura 4.11 – Perfil transversal do campo elétrico da seção 2 – comparação entre valores medidos e calculados.

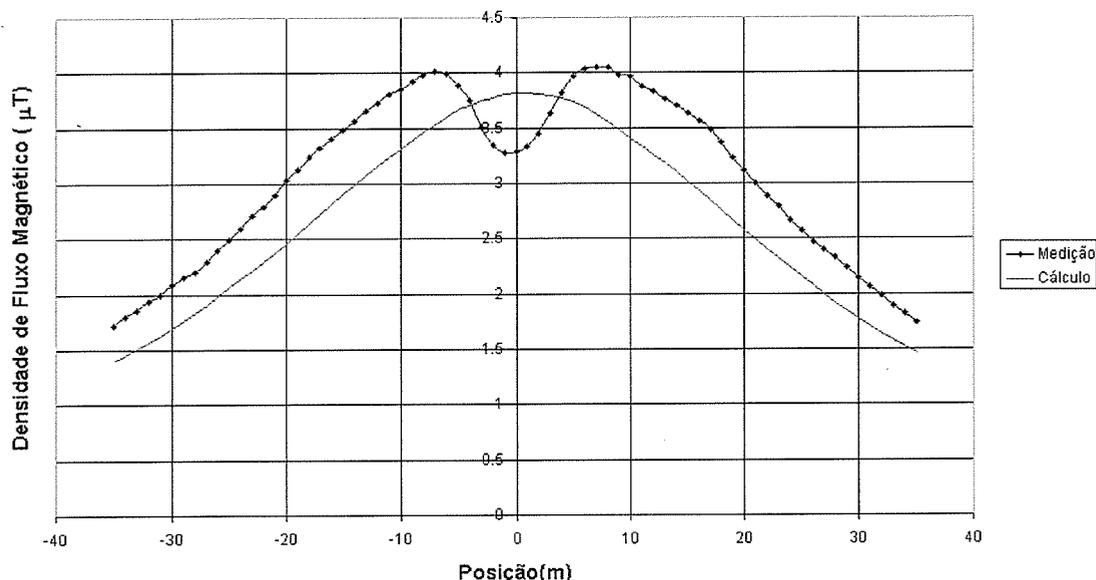
Perfil Transversal de Densidade de Fluxo Magnético

Figura 4.12 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 2 – comparação entre valores medidos e calculados.

As influências dos obstáculos para o campo elétrico são notadas claramente no gráfico da Figura 4.11 onde os valores medidos em alguns pontos foram atenuados a aproximadamente zero. Os valores calculados não apresentam essas variações devido a não representação desses obstáculos no procedimento de cálculo adotado.

Para a densidade de fluxo magnético, conforme apresenta o gráfico da Figura 4.12, ocorreu apenas uma pequena influência da estrutura, reduzindo os valores medidos em seu interior. Nota-se também que os valores calculados nos pontos externos à estrutura foram menores que os valores medidos. Nessa região ocorre a inclinação dos condutores em relação ao plano do solo devido à suspensão do mesmo na estrutura e a rápida variação da altura cabo-solo e será analisado posteriormente em um item específico.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os gráficos dos perfis transversais de campo elétrico e magnético da seção 59, localizada no eixo da estrutura 52, conforme mostra a Figura 4.13.

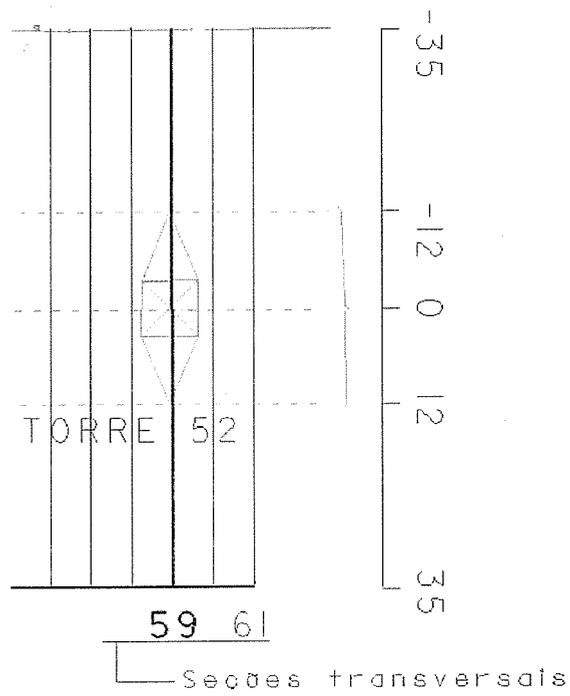


Figura 4.13 – Detalhe da seção 59 no eixo da estrutura 52

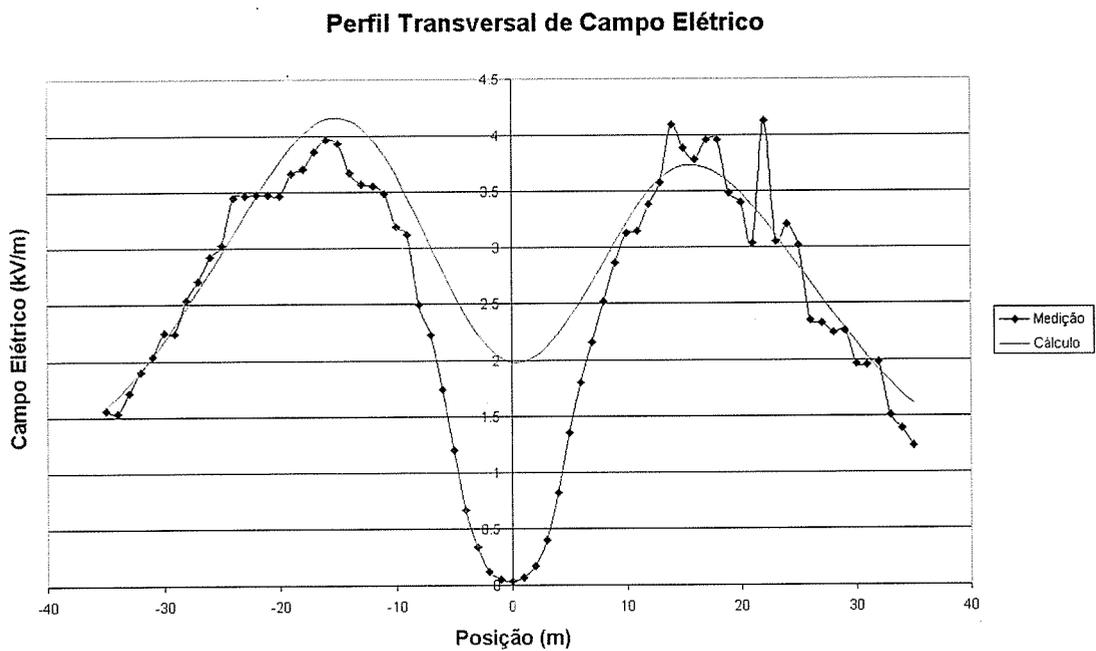


Figura 4.14 – Perfil transversal do campo elétrico da seção 59 – comparação entre valores medidos e calculados.

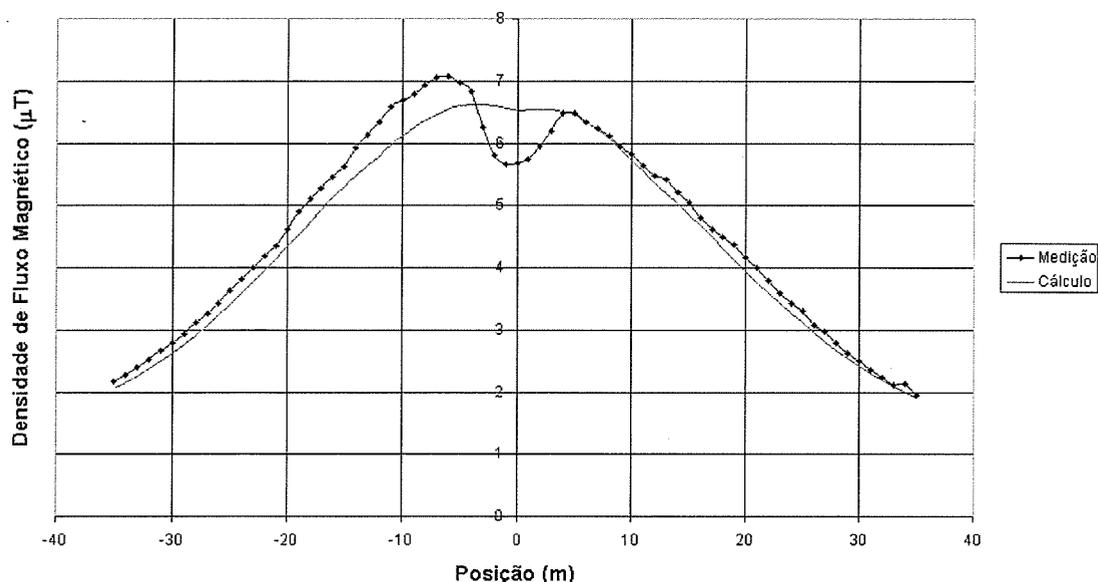
Perfil Transversal de Densidade de Fluxo Magnético

Figura 4.15 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 59 – comparação entre valores medidos e calculados.

Como ocorreu na seção 2 localizada no eixo da estrutura 51, o campo elétrico sofreu uma grande influência da estrutura sendo atenuado a próximo de zero no seu interior. Nos pontos localizados no exterior da estrutura, observa-se uma grande aproximação entre os valores medidos e calculados, já que não há a presença de grandes obstáculos. Algumas variações isoladas (picos) são notadas nos valores medidos e são devidas às vegetações de pequeno porte presentes nos pontos de medição.

Novamente, a densidade de fluxo magnético apresentou apenas uma pequena influência nos pontos do interior da estrutura.

Para pontos no exterior da estrutura, as divergências entre os valores medidos e calculados da densidade de fluxo magnético foram menores do que para a seção 2. Nessa região ocorre uma menor inclinação dos condutores em relação ao plano do solo.

Uma rede de distribuição monofásica que atravessa a faixa de servidão sob a LT, passa sobre as seções 48, 50 e 52 nos pontos 26, 10 e -6 respectivamente, conforme mostra a Figura 4.16.

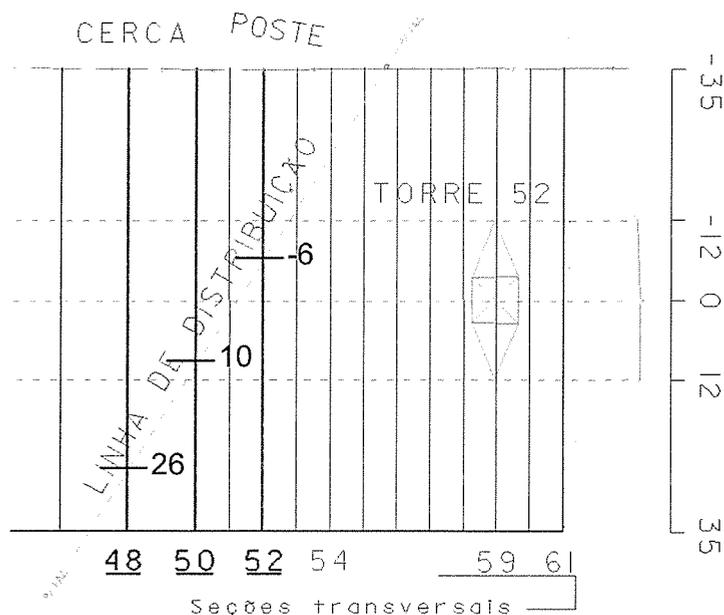


Figura 4.16 – Detalhe das seções localizadas sob uma rede de distribuição.

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam os gráficos dos perfis transversais de campo elétrico das seções 48, 50 e 52, respectivamente. As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam os gráficos das densidades de fluxo magnético das mesmas seções. Nota-se claramente para o campo elétrico a influência nos valores medidos nas regiões em que a rede de distribuição corta a seção.

Os valores medidos da densidade de fluxo magnético apresentaram pequenas variações nessas regiões. Entretanto, essa pequena variação encontrada não pode ser atribuída somente à rede de distribuição, sendo que em outras seções do vão foram encontradas variações dessa grandeza devido a diferenças de topografia, influência da catenária e variação da corrente.

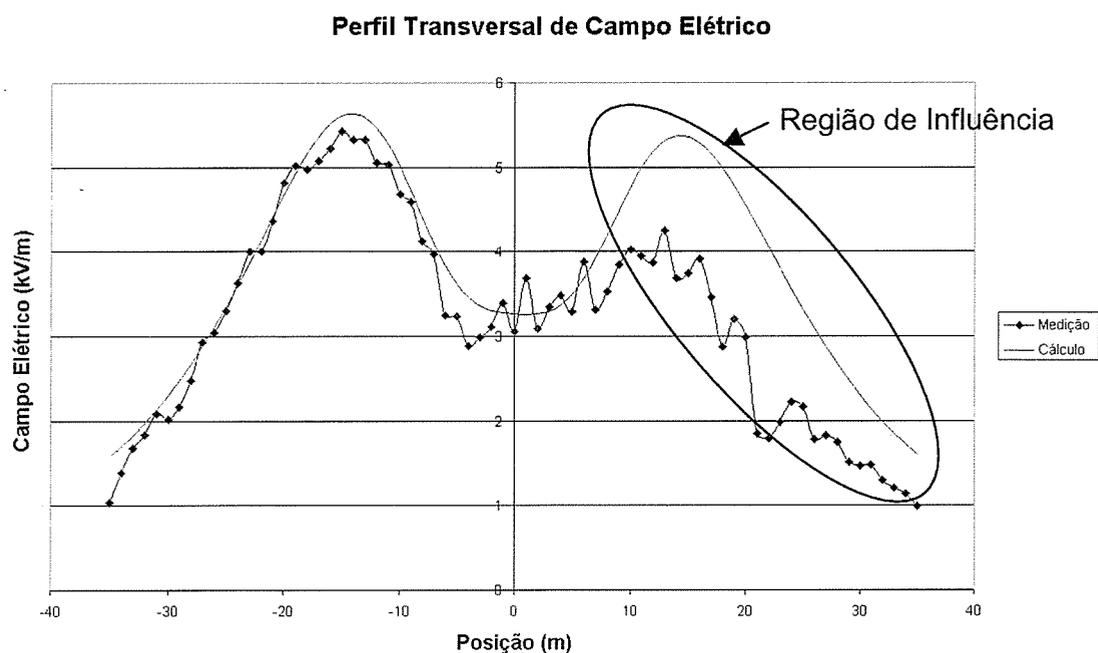


Figura 4.17 – Perfil transversal do campo elétrico da seção 48 – comparação entre valores medidos e calculados.

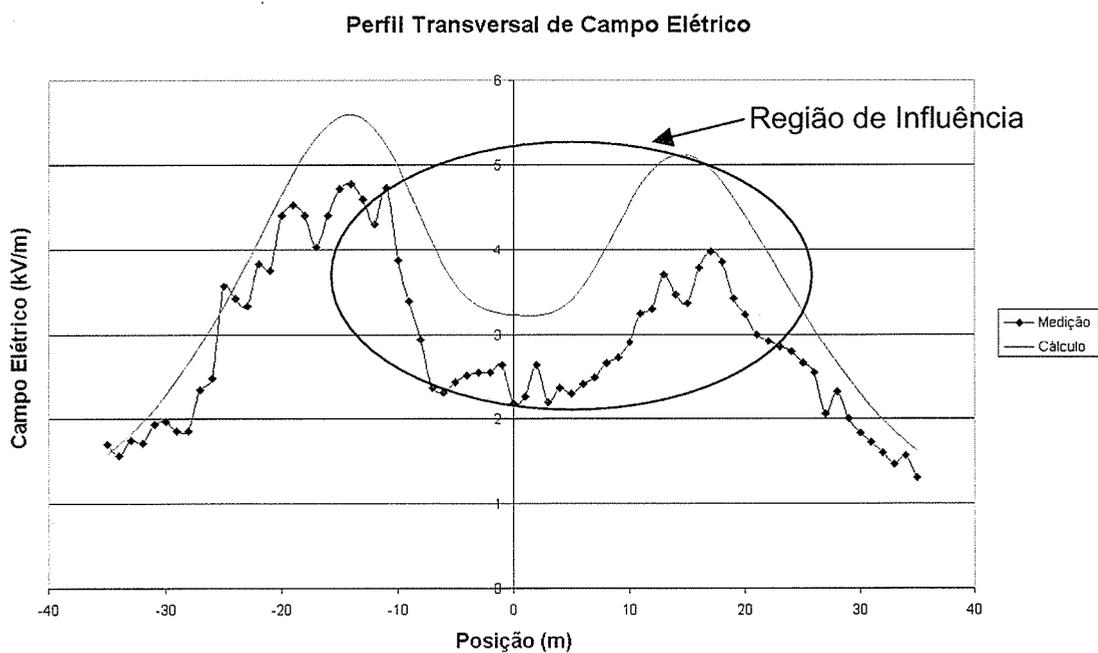


Figura 4.18 – Perfil transversal do campo elétrico da seção 50 – comparação entre valores medidos e calculados.

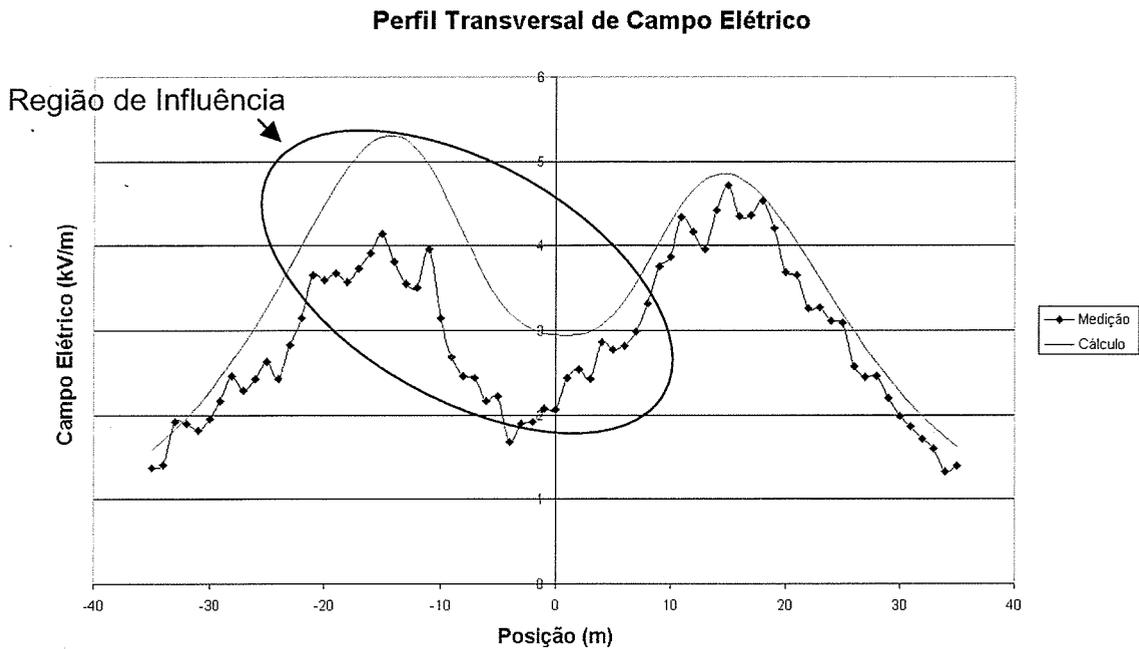


Figura 4.19 – Perfil transversal do campo elétrico da seção 52 – comparação entre valores medidos e calculados.

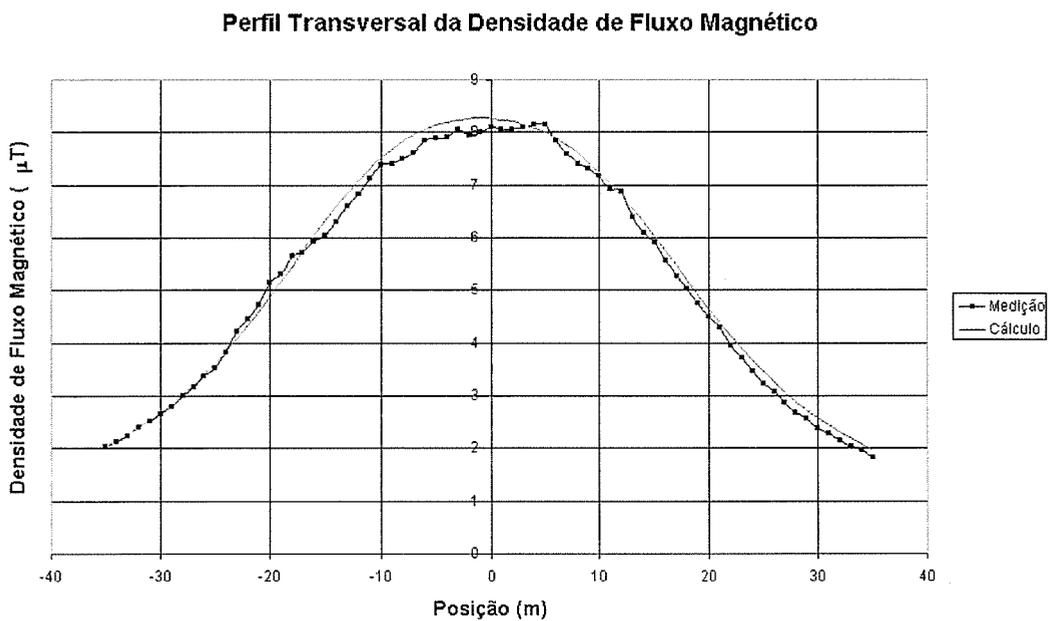


Figura 4.20 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 48 – comparação entre valores medidos e calculados.

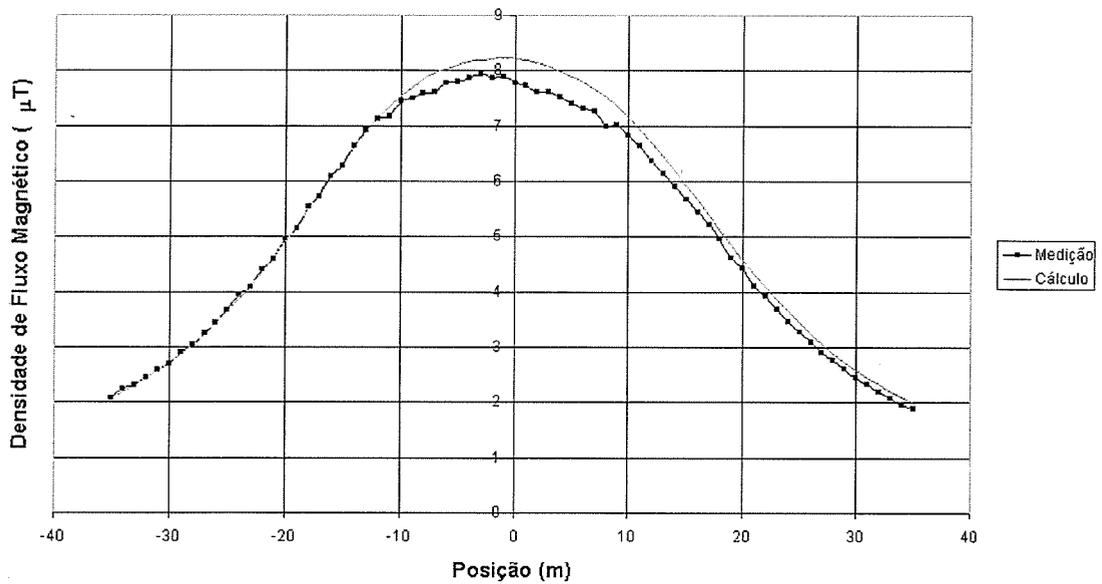
Perfil Transversal da Densidade de Fluxo Magnético

Figura 4.21 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 50 – comparação entre valores medidos e calculados.

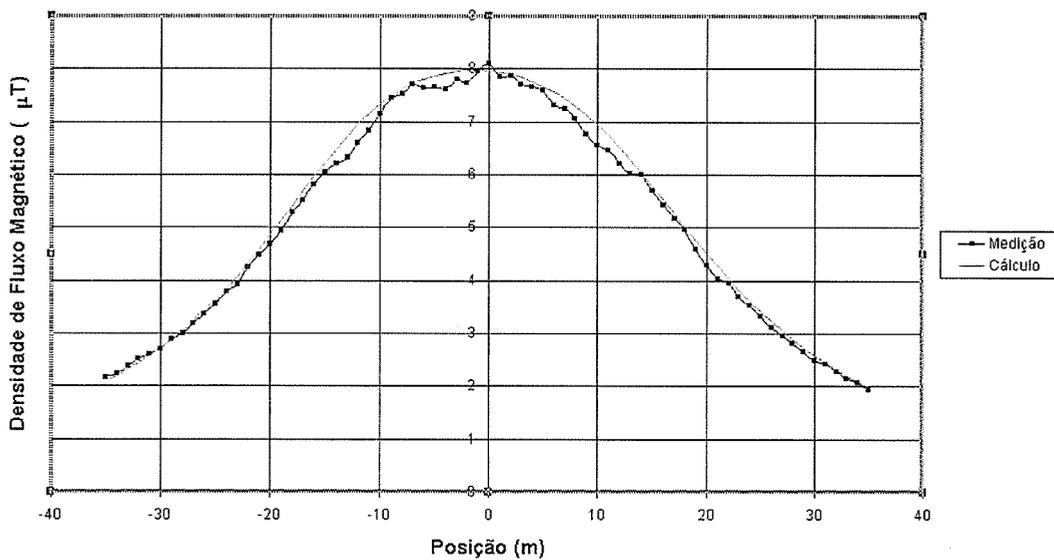
Perfil Transversal da Densidade de Fluxo Magnético

Figura 4.22 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 52 – comparação entre valores medidos e calculados.

4.3.2 Região de menor altura cabo solo

As Figuras 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 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 em estudo. 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 μT para a densidade fluxo magnético e 10,48 kV/m para o campo elétrico.

Pequenas diferenças entre os valores medidos e calculados para o campo elétrico foram obtidas 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. Para os pontos externos aos condutores 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 externas.

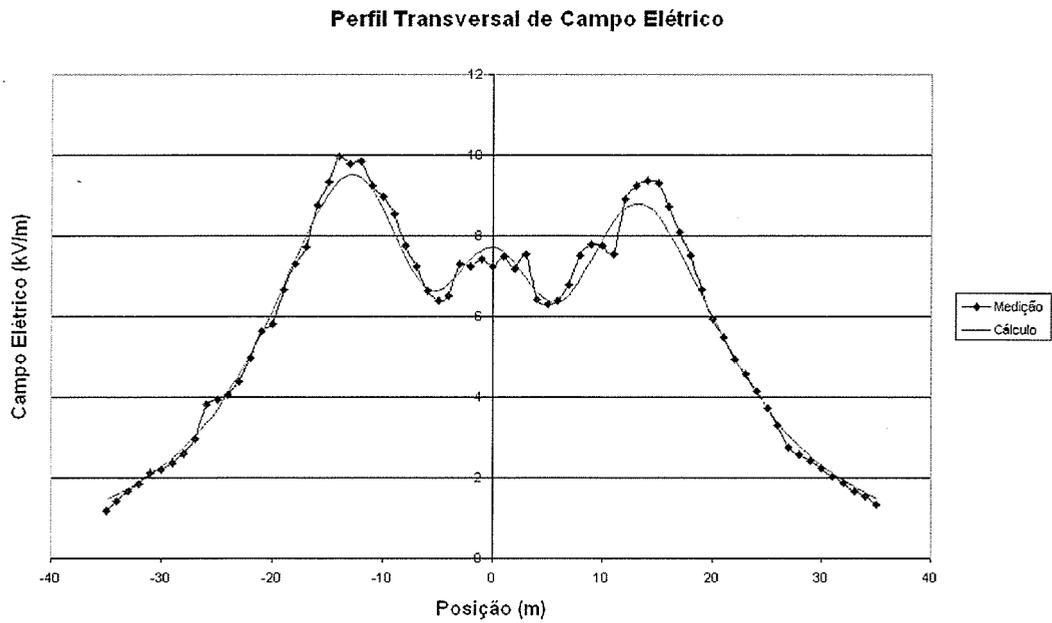


Figura 4.23 – Perfil transversal do campo elétrico da seção 28 – comparação entre valores medidos e calculados.

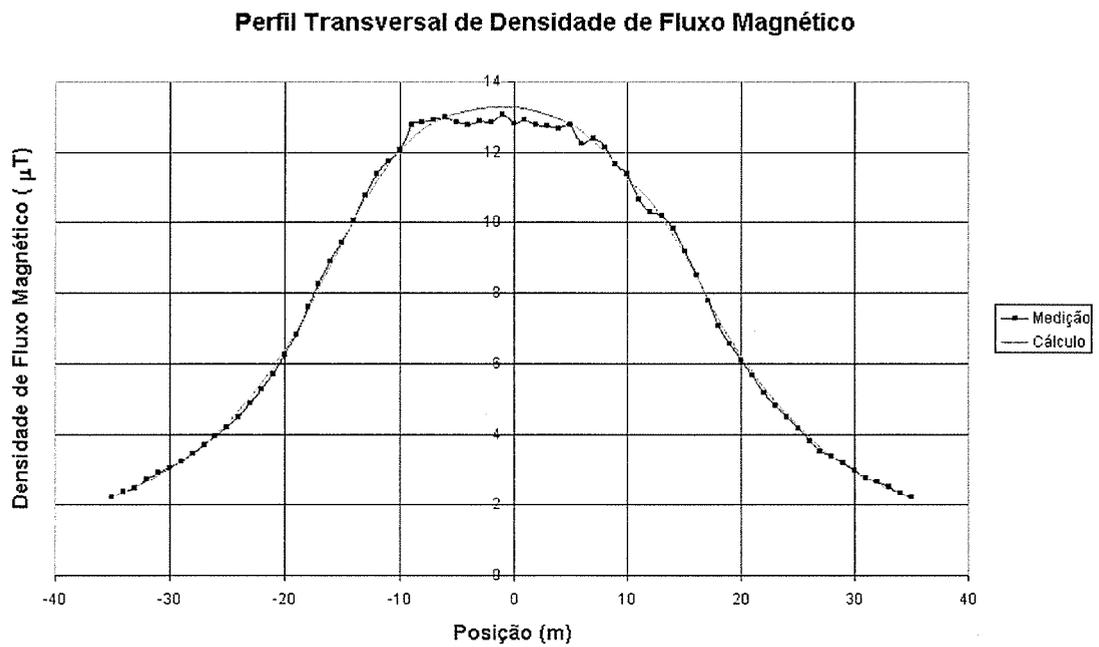


Figura 4.24 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 28 – comparação entre valores medidos e calculados.

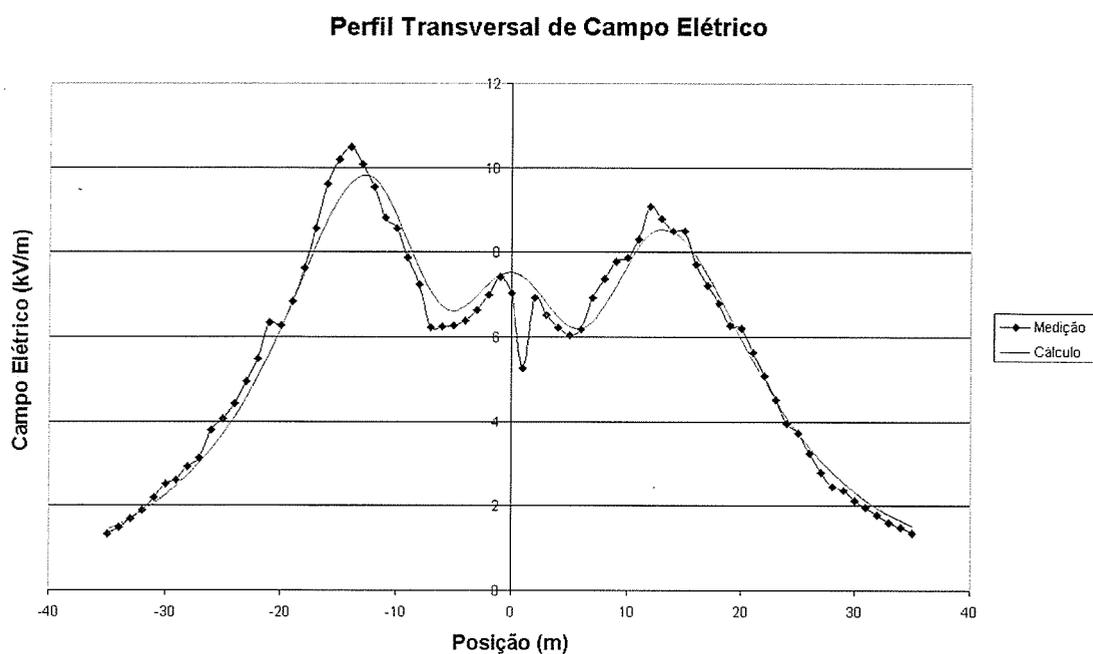


Figura 4.25 – Perfil transversal do campo elétrico da seção 29 – comparação entre valores medidos e calculados.

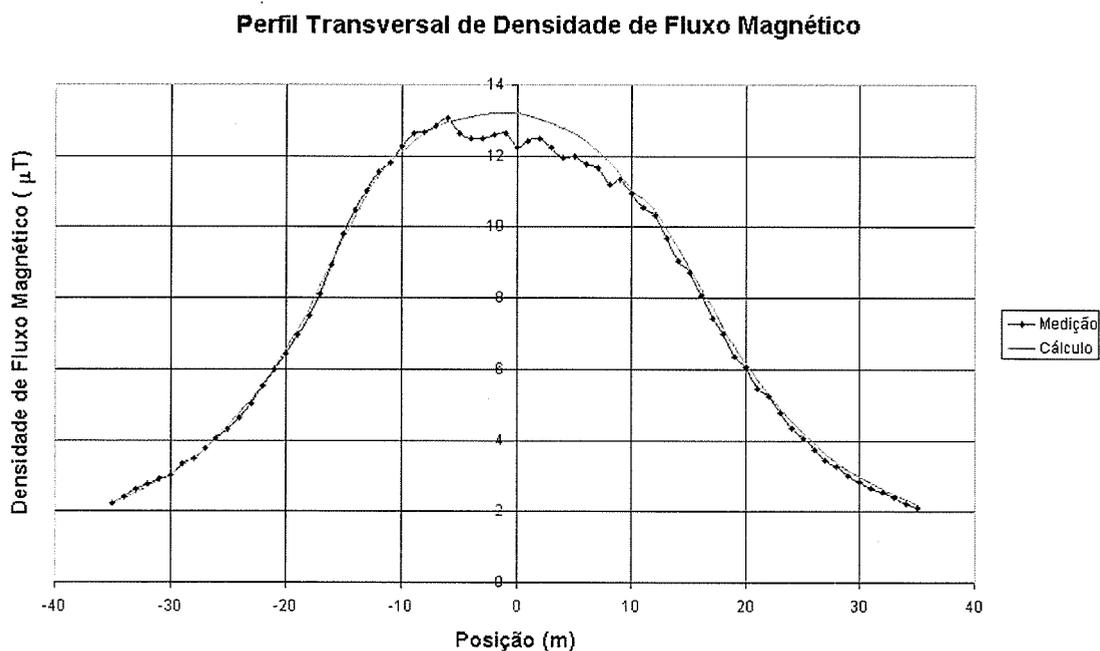


Figura 4.26 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 29 – comparação entre valores medidos e calculados.

Conforme apresentado no gráfico da Figura 4.26, os valores medidos da densidade de fluxo magnético na região entre os pontos -8 a 9, apresentam uma redução localizada alterando a tendência da curva. Conforme descrito no item 3.4.2, "Variáveis de Entrada", o valor de corrente utilizado para o cálculo de cada seção transversal foi a média dos valores para o período de medição da seção. Para essa seção, foram analisados os valores de corrente durante a medição do perfil transversal e observado que ocorreu uma variação considerável da corrente, conforme mostra a Tabela 4.1. O tempo para medição dos 71 pontos dessa seção foi de aproximadamente 5 minutos, com início às 15:01 h e término às 15:06 h, conforme dados armazenados pelo equipamento de medição.

Tabela 4.1 – Valores de corrente no momento das medições da densidade de fluxo magnético da seção 29

Hora medição	15:01	15:02	15:03	15:04	15:05	15:06	Média
Corrente (A)	638	648	657	621	654	628	641
Ponto medição	35	21	6	-4	-15	-30	---

Em uma análise da influência da variação da corrente no cálculo da densidade de fluxo magnético, foram feitas simulações considerando a corrente mínima (621 A) e média (641 A) para a seção e comparados com os valores medidos, conforme mostra o gráfico da Figura 4.27.

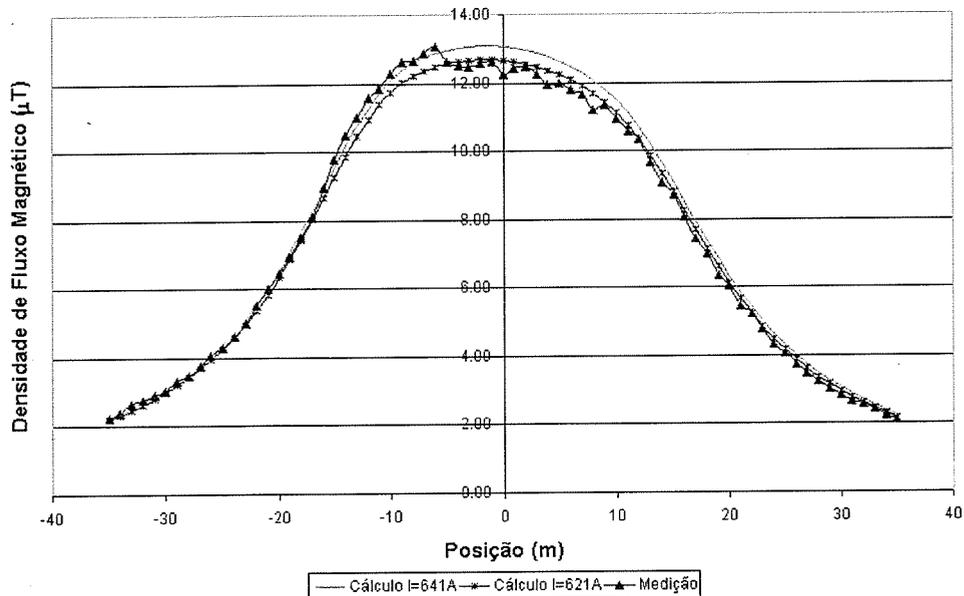
Perfil Transversal da Densidade de Fluxo Magnético

Figura 4.27 – Comparação entre valores medidos e calculados com a variação da corrente.

Observa-se que ocorre uma variação linear para os valores de densidade de fluxo magnético em relação a corrente, isto é, para um aumento de 3,12% no valor de corrente foi observado o mesmo aumento percentual para todos os valores de densidade de fluxo magnético calculados na seção transversal. Essa relação era esperada, pois as demais variáveis de entrada como as alturas cabo-solo não sofrem alterações significativas para variações rápidas de corrente.

Conforme apresentado no gráfico da Figura 4.25, ocorreram algumas variações nos valores medidos do campo elétrico, mantendo a tendência da curva.

Os valores máximos de campo elétrico e de densidade de fluxo magnético de uma LT geralmente ocorrem na região de menor altura dos condutores para o solo, conforme mostrado pelas seções 28 e 29. Para avaliação da influência da variação da altura dos condutores nos valores de campo elétrico e de densidade do fluxo magnético ao nível do solo sob a LT, foram feitas simulações considerando a altura mínima (11m) e a altura média equivalente

dos condutores (12,5m) [23], calculada pela equação 4.1. A Figura 4.28 mostra um desenho esquemático da definição da altura média equivalente.

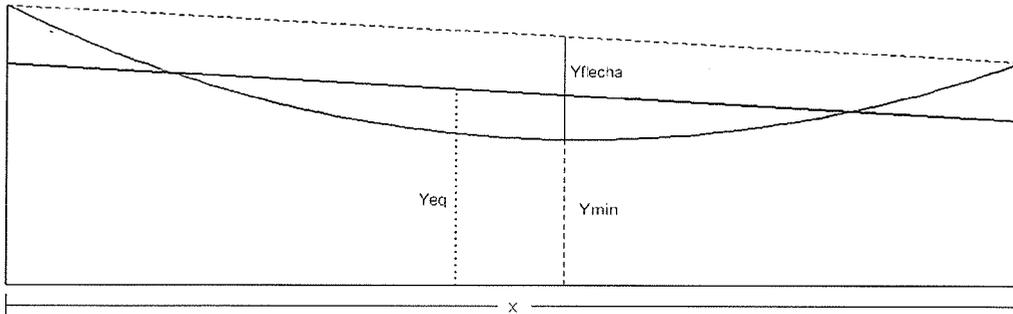


Figura 4.28 – Definição da altura média equivalente.

$$Y_{eq} = Y_{min} + \frac{1}{3} \times Y_{flecha} \quad (4.1)$$

As Figuras 4.29 e 4.30 mostram as comparações dos resultados das simulações considerando a altura mínima e altura média equivalente dos condutores [23].

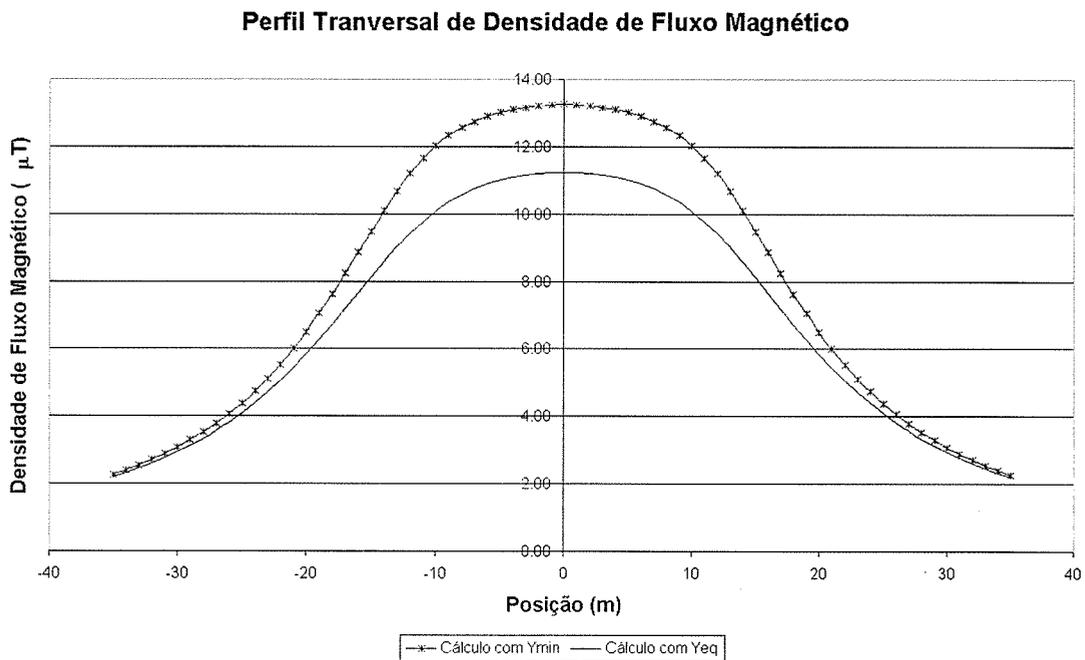


Figura 4.29 – Comparação dos valores calculados de densidade de fluxo magnético considerando Y_{min} e Y_{eq} .

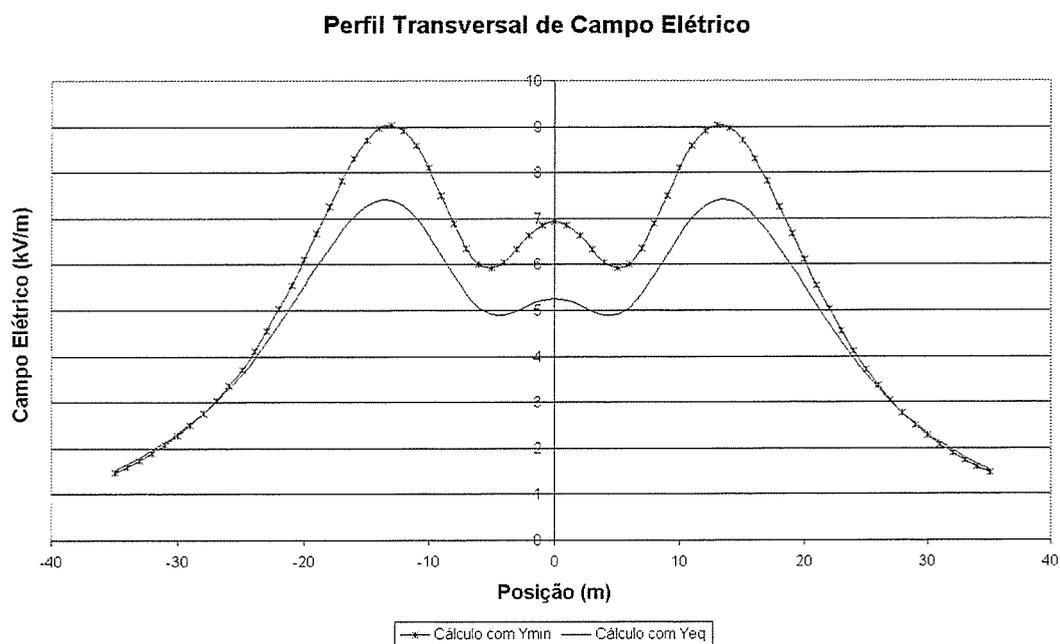


Figura 4.30 – Comparação dos valores calculados de campo elétrico considerando Y_{min} e Y_{eq} .

Observa-se uma variação de aproximadamente 18% no valor de campo elétrico máximo e de aproximadamente 15% no valor de densidade de fluxo magnético máximo para uma variação de 13,6% na altura dos condutores. As maiores variações foram na região localizada entre os pontos -15 a 15. Para pontos localizados próximos ao limite da faixa de servidão a variação ficou em torno de 3% para os valores das duas grandezas.

4.3.3 Região de maior inclinação dos condutores

A consideração da catenária no cálculo da densidade do fluxo magnético pode ser feita através da lei de Biot-Savart, com a utilização da equação da catenária. Esta equação contém funções hiperbólicas e freqüentemente não podem ser resolvidas analiticamente, necessitando de integrações numéricas [17]. Para o campo elétrico a mesma solução pode ser aplicada utilizando a lei de Gauss [25].

Conforme descrito no capítulo 2, para o cálculo da densidade de fluxo magnético de cada seção transversal nesse trabalho, foram consideradas as

linhas de corrente como retas paralelas ao solo, localizadas na posição real dos condutores de cada fase. Conforme as comparações entre os valores medidos e calculados mostradas, a seção 2 no eixo da estrutura 51 apresentou uma diferença de aproximadamente 15% entre os valores da densidade de fluxo magnético, para todo o perfil transversal. Nessa região, os condutores apresentam uma inclinação considerável em relação ao plano do solo devido à suspensão dos mesmos na estrutura e a rápida variação da altura cabo-solo, criando uma forma particular (triangular), conforme mostra a figura 4.31.

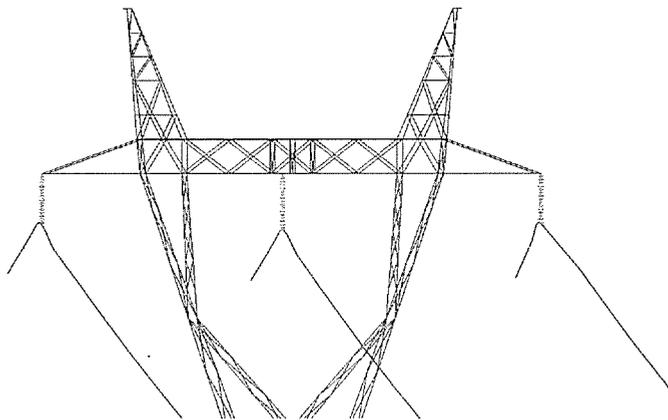


Figura 4.31 – Detalhe da inclinação dos condutores em relação ao plano do solo.

As Figuras 4.32, 4.33 e 4.34, apresentam os gráficos dos perfis transversais da densidade de fluxo magnético para as seções 1, 4 e 7, situadas a -5 m, 10 m e 25 m respectivamente do centro da estrutura.

Para o caso analisado, nota-se que a diferença entre os valores calculados e medidos para a seção 4 localizada a 10 metros do ponto de suspensão dos condutores é menor do que para a seção 1 que está a 5m. Para a seção 7 localizada a 25 metros do ponto, praticamente não houve diferença entre os valores calculados e medidos.

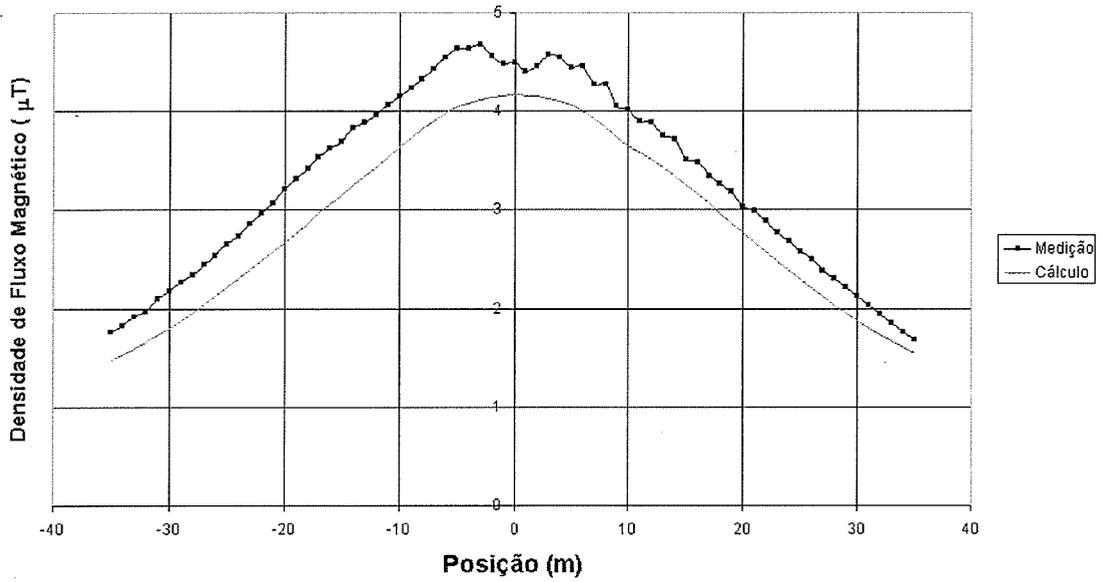
Perfil Transversal de Densidade de Fluxo Magnético

Figura 4.32 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 01 – comparação entre valores medidos e calculados.

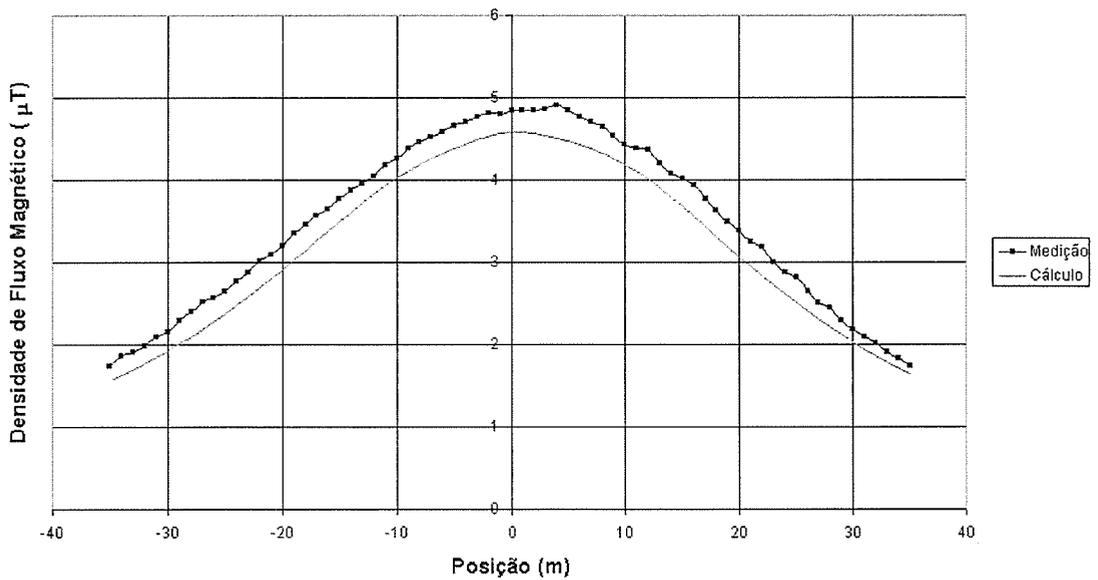
Perfil Transversal de Densidade de Fluxo Magnético

Figura 4.33 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 04 – comparação entre valores medidos e calculados.

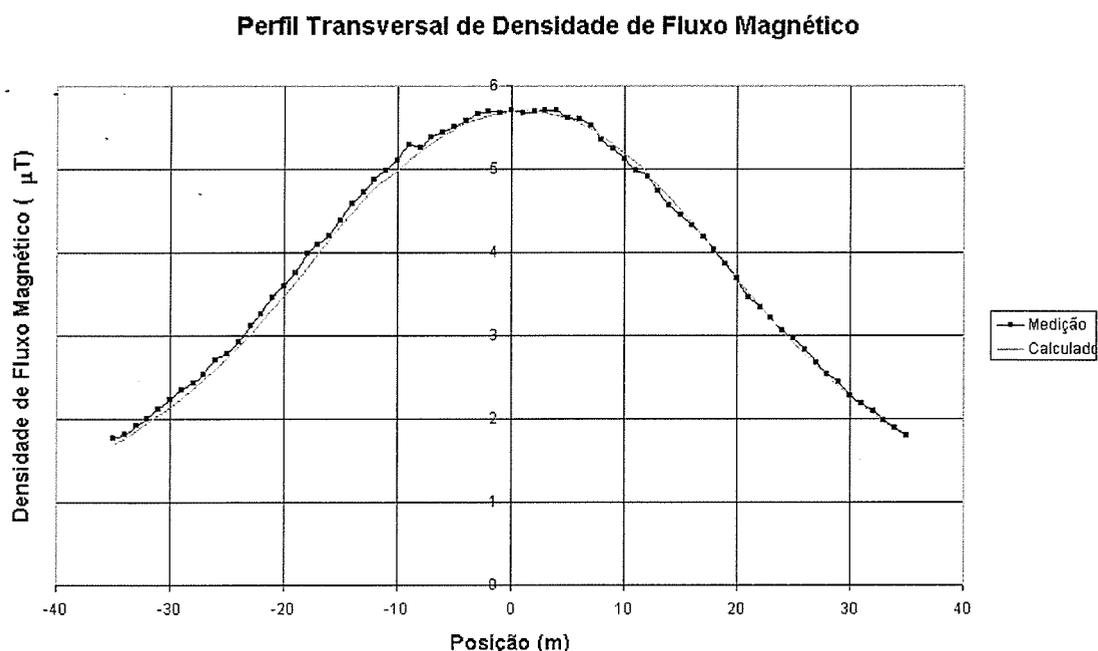


Figura 4.34 – Perfil transversal da densidade de fluxo magnético da seção 07 – comparação entre valores medidos e calculados.

Para região nas proximidades da estrutura 52 onde os condutores apresentam uma menor inclinação devido à suspensão dos mesmos na estrutura, foi observada uma diferença menor que 7% entre os valores medidos e calculados da densidade de fluxo magnético na seção no eixo da estrutura, conforme mostra a Figura 4.15. As demais regiões do vão não foram notadas divergências semelhantes

Dessa forma, conforme resultados apresentados, a influência da catenária no cálculo da densidade do fluxo magnético ao nível do solo para a LT, ocorreu em regiões localizadas que apresentaram uma grande inclinação dos condutores em relação ao plano do solo.

4.4 Considerações finais sobre as comparações

Conforme os resultados apresentados e considerando as incertezas associadas às medições, os resultados dos procedimentos de cálculo adotados neste trabalho apresentaram boa coerência com os valores medidos.

As maiores divergências entre os valores calculados e medidos da densidade de fluxo magnético foram na região de maior inclinação dos cabos condutores, onde os valores calculados foram menores que os medidos, e no interior da estruturas com a inversão dessa relação. Nas demais regiões, os resultados apresentaram uma boa concordância.

Para o campo elétrico, as maiores diferenças entre os valores calculados e medidos foram nas seções com a presença de cercas, árvores, estruturas, rede de distribuição e a mata fechada, sendo os valores calculados superiores aos medidos. Nas demais regiões, os valores não apresentaram grandes divergências, exceto em pontos isolados em que a vegetação de pequeno porte causou uma elevação nos valores medidos.

As comparações mostraram que quando for necessária uma maior precisão na determinação dos campos elétricos e magnéticos através de cálculos, deverá ser dada uma atenção especial na obtenção das variáveis de entrada. Uma imprecisão na definição dessas variáveis poderá ocasionar erros da mesma ordem de grandeza dos campos no resultado das simulações.

4.5 Comparações com normas e diretrizes

Atualmente, a única norma brasileira vigente que define limites relacionados aos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão é a NBR-5422 [23], que estabelece o valor de 5 kV/m no limite da faixa de segurança para o campo elétrico e não estabelece limite para a densidade de fluxo magnético. Essa norma, que está em revisão, estabelece no seu último “draft” os valores de 4,17 kV/m para o campo elétrico e 83,3 μ T para o densidade de fluxo magnético no limite da faixa de segurança. A Tabela 4.2 apresenta uma comparação entre os valores máximos obtidos no limite da faixa de servidão e os valores recomendados pela NBR-5422 [23] na versão vigente e na sua última revisão.

Tabela 4.2 – Comparação entre valores máximos medidos no limite da faixa de segurança e valores de normas

	NBR-5422		Valor medido
	vigente	revisão	
Campo Elétrico (kV/m)	5,0	4,17	1,6
Densidade de Fluxo Magnético (μ T)	-	83,3	2,2

A comparação mostra que os valores medidos para a LT no limite da faixa de segurança estão dentro dos limites recomendados pelas normas.

5 Conclusões

Nos últimos anos, com o acentuado crescimento das cidades, cada vez mais as linhas de transmissão de energia estão sendo envolvidas por regiões povoadas e dividem espaço com outras instalações, às vezes de forma legal pela elaboração de projetos de compartilhamento como jardins ou muitas vezes através de invasões nas faixas de servidão. Em ambos os casos, os riscos devem ser avaliados e ações devem ser tomadas para evitar que pessoas sejam expostas a níveis de campos elétricos e magnéticos superiores aos estabelecidos por normas e diretrizes [2]. Dessa forma, torna-se necessária a determinação dos campos elétricos e magnéticos de forma eficaz.

Este trabalho teve por objetivo avaliar um procedimento de cálculo e um procedimento de medições, através da caracterização do ambiente eletromagnético de uma LT de 500 kV, bem como a influência das variáveis de entrada no procedimento de cálculo, através da comparação entre os resultados das medições e simulações.

Para avaliação do procedimento de medição dos campos elétricos e magnéticos, foram realizadas medições em 71 pontos de 41 seções transversais ao sentido longitudinal da LT, abrangendo a extensão de um vão, totalizando 2840 pontos de cada grandeza.

As medições do campo elétrico apresentaram uma maior dificuldade em relação às medições da densidade de fluxo magnético, devido à necessidade de distanciamento do operador ao sensor, neste caso feito através de um "link" de fibra ótica e a utilização de um tripé de madeira, resultando em um tempo 3 vezes superior ao gasto para a medição da outra grandeza.

Os resultados das medições mostraram que os campos elétricos sofrem maiores interferências de obstáculos como cercas, árvores, estruturas e redes de distribuição, apresentando atenuações significativas em pontos sob os obstáculos e picos em pontos localizados sobre os obstáculos. A densidade de

fluxo magnético não apresentou variações significativas, tendo uma maior variação para pontos localizados no interior das estruturas. Os valores máximos dos campos foram medidos na região de menor altura cabo solo, ocorrendo neste caso na região sob os condutores externos para o campo elétrico e no eixo da LT para a densidade de fluxo magnético.

Para a realização dos cálculos e com a finalidade de garantir uma credibilidade aos dados de entrada, foi realizado um levantamento de dados detalhado com a utilização de equipamentos de alta precisão. Os resultados mostraram que erros significativos podem ocorrer durante a definição do perfil topográfico, se equipamentos de precisão não forem utilizados. Fato esse observado na comparação entre os resultados e inspeções visuais realizadas durante as medições dos campos elétrico e magnético, que apresentaram desníveis de até 3 metros para seções transversais consideradas planas.

A implementação do procedimento de cálculo pode ser considerada uma tarefa fácil, tendo em vista a simplicidade do método de cálculo e a funcionalidade do programa utilizado. As simulações não acrescentaram dificuldades ao processo, devido à utilização de uma ferramenta de interface entre as planilhas de armazenamento dos dados e o programa de cálculo.

As comparações entre os resultados das medições e as simulações apresentaram maiores divergências para a densidade de fluxo magnético na região de inclinação dos condutores, sendo os valores calculados menores que os medidos, e no interior das estruturas onde os valores calculados foram maiores que os medidos. Para o campo elétrico, as maiores divergências ocorreram nas seções com a presença de obstáculos (cercas, árvores, estruturas, rede de distribuição), sendo os valores calculados maiores para pontos sob os obstáculos e menores em pontos sobre os obstáculos.

Assim, de uma forma geral, os procedimentos de cálculo podem fornecer bons resultados se as variáveis de entrada forem bem definidas. Entretanto, a definição dessas variáveis pode ser uma tarefa difícil e até inviável devido às dimensões e ao traçado das linhas de transmissão que geralmente apresentam

topografias variáveis ao longo do seu percurso, além de cada vez mais dividir espaços com outras instalações.

Dessa forma, os dados de entrada para o cálculo dos campos elétricos e magnéticos podem ser considerados uma fonte potencial de divergências entre os valores reais e calculados, podendo comprometer qualquer método de cálculo, seja este mais completo ou simplificado. A utilização de procedimentos de cálculo baseado em equações analíticas pode ser uma ferramenta útil, apesar das simplificações, se as fontes de erros forem controladas e as aplicações bem definidas.

Programas de cálculo baseado em tratamentos estatísticos dos dados de corrente ao longo de um período [15] são apresentados na literatura. Entretanto, conforme as diretrizes internacionais [2] que recomendam limites máximos dos campos elétricos e magnéticos de acordo com os efeitos adversos à saúde estabelecidos e que não são relacionados ao tempo de exposição, devendo ser atendidos a todo o momento, esse tratamento torna-se desnecessário. Dessa forma, para o cálculo durante a fase de projeto da LT, quando a intenção for determinar os campos resultantes máximos que poderão ser gerados, valores mínimos para as alturas cabo-solo e os máximos de corrente e tensão estabelecidos por normas devem ser considerados.

Vale ressaltar que as conclusões obtidas com este trabalho baseiam-se nos resultados da avaliação para uma LT específica. A análise da abrangência dessas conclusões para outras LT com diferentes configurações e níveis de tensão é proposta de continuidade deste trabalho.

5.1 Propostas de Continuidade

A avaliação dos níveis de campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão de energia de diversas características e níveis de tensão é essencial para validação dos procedimentos utilizados neste trabalho. Dessa forma, na continuidade do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) do qual este trabalho é parte, serão avaliados os procedimentos aqui adotados

para outras LT. Também serão avaliados os procedimentos de medição para LT urbana, para o qual será necessário implementar a determinação dos campos elétrico e magnético em um perfil vertical para avaliação dos campos em outras alturas do solo, buscando avaliar a situação de um prédio nas proximidades de uma LT.

Ultimamente, buscando a disponibilidade de uma maior capacidade de transmissão nas LT, estão sendo desenvolvidos modelos estatísticos que determinam os limites de capacidade através do conhecimento ou predição de variáveis ambientais, bem como a temperatura do condutor, corrente e menor altura cabo-solo da LT. Para o conhecimento dessas variáveis são utilizados sistemas de monitoramento que disponibilizam essas grandezas em tempo real. Dessa forma, com a aplicação dos procedimentos de cálculo utilizados neste trabalho e a obtenção em tempo real das variáveis de entrada, poderão ser desenvolvidos sistemas de monitoramento de campos elétricos e magnéticos para LT.

O desenvolvimento de uma metodologia para caracterização dos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão de energia baseado nos resultados desse trabalho juntamente com a caracterização de outras LT de diferentes configurações e níveis de tensão é uma proposta de continuidade deste trabalho. Essa metodologia irá subsidiar a elaboração de normas relativas a procedimentos de medição e cálculo dos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão.

Referências Bibliográficas

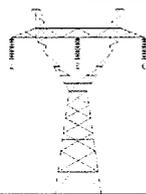
- [1] "*Campos Eletromagnéticos – Limites e Critérios – Situação no Brasil*", Relatório do GT-MME: Grupo de trabalho formado por empresas do setor elétrico brasileiro no Ministério de Minas e Energia, Agosto, 2003
- [2] ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields. Health Physics vol. 74, pp. 494-522, April 1998.
- [3] IEC 61786:1998, "*Measurement of Low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings- Special requirements for instruments and guidance for measurements.*"
- [4] IEEE Std 644-1994, "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines", IEEE Standards Board, December, 1994.
- [5] "*Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above*", EPRI – Electric Power Research Institute, Second Edition, 1982.
- [6] Miller Jr, C. J., "*The Measurement of Electric Fields in Live Line Working*" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, nº 4, pp. 493–498, April, 1967.
- [7] Deno, D. W., "*Transmission Line Fields*", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-95, nº 5, September/October 1976.
- [8] Bracken, T. D., "*Field Measurements and Calculations of Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-95, nº 2, pp. 494–504, March/April, 1976.
- [9] "*Measurement of Electric and Magnetic Fields From Alternating Current Power Lines*", A report prepared by the Working Group on Electrostatic and Electromagnetic Effects of Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, nº 4, pp. 1104–1114, July/Aug, 1978.
- [10] IEEE Std 1460-1996, "*IEEE Guide for the Measurement of Quasi-Static Magnetic and Electric Fields*", IEEE Standards Board, December, 1996.
- [11] "*Magnetic Fields from Electric Power Lines Theory and Comparison to Measurements*", A Report of the IEEE Magnetic Fields Task Force, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, nº 4, pp. 2127–2136, October 1988.
- [12] Olsen, R. G.; Wong, P. S., "*Characteristics of Low Frequency Electric and Magnetic Fields in the Vicinity of Electric Power Lines*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, nº. 4, pp. 2046 - 2055, October, 1992.

-
- [13] Dawalibi, F. P.; Selby, A., “*Electromagnetic Fields of Energized Conductors*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, n°. 3, July, 1993.
- [14] Dawalibi, F. P., “*Computation of Electromagnetic Fields Produced by Electric Power Lines and Residential Electrical Wiring*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, n°. 3, pp. 1285-1294, July, 1993.
- [15] Olsen, R. G., “*Electromagnetic Fields from Power Lines*”, CH3310-0/93/0000-0025, IEEE, 1993.
- [16] Maruvada, P. S.; Goulet, D. L., “*Study of Population Exposure to Magnetic Fields due to Secondary Utilization of Transmission Line Corridors*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1541-1548, July, 1995.
- [17] Mamishev, A. V.; Nevels, R. D.; Russell, B. D., “*Effects of Conductor Sag on Spatial Distribution of Power Line Magnetic Field*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, n°. 3, pp. 1571-1576, July, 1996.
- [18] Liu, J.; Ruan, W.; Dawalibi, F. P., “*Electromagnetic Fields Near High Voltage Electrical Power Lines: A Parametric Analysis*”, Safe Engineering Services & Technologies Ltd, <http://www.sestech.com>
- [19] Domíngues, L. A. M. C.; Barbosa, C. R. N.; Dart, F. C.; Sondermann, M. A. M. V.; Amon, J. F., “*Mapeamento de Campos Eletromagnéticos em Linhas do Sistema de Transmissão de Furnas (138 kV – 765 kV)*”, XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro, 2003, Uberlândia.
- [20] Ferreira, F., “*Métodos de Evaluación de Campos Eléctricos Y Magnéticos en Líneas de Alta Tensión*”, X ERLAC - Décimo Encuentro Regional Latino Americano de La Cigré, Mayo, 2003, Argentina.
- [21] Narda Safety Test Solutions, EFA-200/300 Analisador de Campo Eletromagnético, “*Manual de Operação*”.
- [22] H. Singer, H. Steinbigler, e P. Weiss, “*A charge simulation method for the calculation of high voltage fields*”, IEEE Trans., vol. PAS-93, pp. 1660-1668, January 1974.
- [23] NBR-5422, “*Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – Procedimento*”, ABNT, Março, 1985.
- [24] “*MATLAB®6 : Fundamentos de Programação*”, Élia Yathie Matsumoto. São Paulo, Érica, 2001.
- [25] Fernandez, J. C; Soibelzon, H. L., “*The Influence of Sag in The Electric Field of High Voltage Overhead Transmission Lines*” ISH, 2001.
-

Apêndice A

Dados de entrada para as simulações

A tabela A.1 apresenta os dados gerais utilizados para os cálculos do campo elétrico e da densidade de fluxo magnético de todas as seções transversais do vão em estudo.

Tabela A.1 – Dados gerais utilizados nos cálculos de todas as seções transversais		
Nº circuitos	1	
Nº de fases	3	
Nº condutores/Fase	3	
Diâmetro do condutor (d_c) (m)	0.02874	
Espaçamentos entre condutores (m)	0.457	
Distância entre Fases (m)	12	

As tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam os dados particulares de cada seção transversal, onde:

- Y_{fase} – Altura dos condutores de cada fase para o solo;
- Tensão – Média da tensão fase-fase utilizada para o cálculo de cada seção;
- Corrente – Corrente média da seção utilizada no cálculo;
- X_n – Pontos no sentido transversal à linha de transmissão;
- Y_n – Altura equivalente a 1 metro do solo, considerando a variação da topografia.

conforme mostra a figura A.1.

Tabela 3 – Dados das seções transversais de 12 a 29

Seções	12	14	16	18	20	22	24	26	28	29
$Y_{\text{fase a}}$	15.17	14.04	13.26	12.74	12.07	11.56	11.49	11.35	11.34	11.53
$Y_{\text{fase b}}$	15.18	13.96	13.25	12.52	11.80	11.48	11.31	11.06	10.91	11.05
$Y_{\text{fase c}}$	15.54	14.10	13.30	12.41	11.87	11.28	11.25	11.11	10.96	10.86
Tensão	547.63	547.63	547.63	547.63	547.63	547.63	545.24	545.24	545.24	545.24
Corrente	651.15	636.45	642.94	619.29	639.86	641.89	648.17	634.54	634.89	641.34
Xn	Yn									
35	2.03	2.02	1.45	1.10	1.02	1.09	1.06	1.00	1.08	1.01
30	2.00	1.94	1.49	1.09	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00
25	1.96	1.94	1.46	1.15	1.06	1.08	1.05	1.39	1.35	1.17
20	1.86	1.83	1.64	1.17	1.16	1.09	1.19	1.38	1.42	1.37
15	1.84	1.76	1.44	1.06	1.10	1.23	1.34	1.55	1.61	1.41
12	1.83	1.91	1.45	1.00	1.26	1.36	1.18	1.39	1.57	1.56
10	1.82	1.94	1.33	1.06	1.38	1.43	1.38	1.46	1.46	1.42
5	1.81	1.93	1.22	1.21	1.48	1.56	1.53	1.78	1.93	1.89
0	1.71	1.92	1.45	1.25	1.55	1.53	1.54	1.83	2.10	2.11
-5	1.64	1.89	1.44	1.26	1.51	1.67	1.59	1.87	2.20	2.23
-10	1.49	1.83	1.39	1.28	1.47	1.70	1.63	1.86	2.20	2.32
-12	1.42	1.83	1.38	1.28	1.45	1.69	1.67	1.88	2.18	2.44
-15	1.37	1.76	1.30	1.30	1.46	1.68	1.65	1.86	2.11	2.43
-20	1.35	1.59	1.25	1.27	1.38	1.63	1.64	1.82	2.00	2.39
-25	1.28	1.37	1.20	1.24	1.30	1.53	1.54	1.78	1.96	2.39
-30	1.00	1.15	1.12	1.14	1.40	1.39	1.18	1.64	1.95	2.16
-35	1.00	1.00	1.00	1.15	1.44	1.34	1.10	1.55	2.06	2.14

Tabela 4 – Dados das seções transversais de 30 a 48

Seções	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
$Y_{\text{fase a}}$	11.98	12.77	12.78	12.93	13.24	13.53	13.86	14.22	14.88	15.32
$Y_{\text{fase b}}$	11.54	12.42	12.97	13.09	13.45	13.55	13.97	14.81	14.73	15.34
$Y_{\text{fase c}}$	11.08	12.09	12.87	13.08	13.16	13.44	13.78	13.65	14.02	15.02
Tensão	545.24	545.24	545.24	545.24	541.39	541.39	541.39	541.39	541.39	541.39
Corrente	641.06	644.09	659.46	654.26	648.16	630.27	630.47	621.86	620.49	619.16
Xn	Yn									
35	1.25	1.52	1.73	1.41	1.33	1.09	1.09	1.17	1.20	1.07
30	1.18	1.51	1.58	1.29	1.25	1.13	1.00	1.03	1.22	1.09
25	1.35	1.61	1.69	1.50	1.26	1.17	1.02	1.02	1.24	1.14
20	1.39	1.47	1.42	1.11	1.09	1.00	1.04	1.01	1.15	1.08
15	1.51	1.18	1.31	1.20	1.08	1.04	1.05	1.06	1.04	1.03
12	1.22	1.00	1.29	1.15	1.09	1.06	1.08	1.11	1.00	1.00
10	1.00	1.03	1.00	1.07	1.04	1.09	1.06	1.09	1.04	1.05
5	1.61	1.35	1.21	1.00	1.00	1.16	1.07	1.04	1.12	1.20
0	1.80	1.49	1.28	1.17	1.04	1.20	1.13	1.00	1.23	1.35
-5	2.01	1.65	1.25	1.01	1.15	1.25	1.23	1.14	1.36	1.49
-10	2.14	1.71	1.36	1.17	1.26	1.27	1.26	1.33	1.52	1.63
-12	2.22	1.78	1.33	1.13	1.29	1.28	1.29	1.42	1.62	1.68
-15	2.34	1.92	1.30	1.20	1.38	1.37	1.39	1.55	1.75	1.81
-20	2.55	2.08	1.54	1.32	1.42	1.58	1.55	1.76	1.99	2.04
-25	2.64	2.27	1.60	1.70	1.81	2.04	1.85	1.98	2.27	2.31
-30	2.48	2.15	1.80	1.72	1.92	2.03	2.05	2.24	2.54	2.53
-35	2.25	2.09	1.92	1.97	2.20	2.25	2.29	2.38	2.78	2.80

Tabela 5 – Dados das seções transversais de 50 a 61

Seções	50	52	54	55	56	57	58	59	60	61
$Y_{\text{fase a}}$	15.77	16.30	16.99	17.35	17.73	18.13	18.61	19.05	18.61	18.12
$Y_{\text{fase b}}$	15.48	16.03	17.01	17.51	17.22	17.54	17.78	18.65	18.01	17.54
$Y_{\text{fase c}}$	15.10	15.60	16.31	16.54	16.84	17.29	17.73	18.11	17.54	17.01
Tensão	541.39	541.39	548.26	548.26	548.26	548.26	548.26	548.26	548.26	548.26
Corrente	630.50	644.00	637.54	654.69	664.98	664.10	662.57	666.24	680.45	663.89
Xn	Yn									
35	1.18	1.00	1.08	1.02	1.12	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00
30	1.09	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.03	1.20
25	1.02	1.00	1.13	1.09	1.13	1.01	1.00	1.20	1.25	1.39
20	1.00	1.00	1.11	1.10	1.18	1.04	1.01	1.04	1.08	1.24
15	1.00	1.00	1.09	1.10	1.18	1.06	1.02	1.05	1.10	1.29
12	1.04	1.08	1.12	1.12	1.19	1.09	1.05	1.08	1.17	1.37
10	1.13	1.13	1.18	1.18	1.26	1.24	1.20	1.25	1.29	1.49
5	1.21	1.24	1.37	1.38	1.45	1.48	1.69	1.68	1.99	1.82
0	1.37	1.39	1.54	1.57	1.71	1.68	1.89	1.48	1.73	1.93
-5	1.51	1.53	1.61	1.63	1.82	1.83	1.97	1.94	2.19	2.27
-10	1.71	1.75	1.74	1.85	2.05	1.92	1.90	2.06	2.21	2.49
-12	1.79	1.85	1.85	1.98	2.13	1.98	1.97	2.05	2.24	2.54
-15	1.92	1.97	2.05	2.17	2.23	2.11	2.13	2.25	2.36	2.59
-20	2.14	2.23	2.38	2.42	2.53	2.48	2.54	2.66	2.79	3.05
-25	2.30	2.37	2.64	2.74	2.84	2.79	2.85	3.05	3.24	3.55
-30	2.64	2.59	2.95	3.04	3.15	3.10	3.23	3.40	3.59	3.89
-35	2.99	3.04	3.11	3.34	3.48	3.41	3.48	3.70	3.90	4.25