

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
PAULA CARVALHO RESENDE**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS NÍVEIS DE CAMPO MAGNÉTICO GERADOS  
POR LINHAS DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE:  
ESTUDO DE CASO SISTEMA FURNAS**

**FORMIGA – MG  
2016**

**PAULA CARVALHO RESENDE**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS NÍVEIS DE CAMPO MAGNÉTICO GERADOS  
POR LINHAS DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE:  
ESTUDO DE CASO SISTEMA FURNAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Msc. Gustavo Lobato Campos

**FORMIGA – MG**

**2016**

Resende, Paula Carvalho  
621.3 Análise computacional dos níveis de campo magnético gerados  
R433a por linhas de transmissão operando em regime permanente: estudo de  
caso Sistema Furnas/ Paula Carvalho Resende. -- Formiga: IFMG, 2016.  
60p.: il.

Orientador: Ms. Gustavo Lobato Campos  
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de  
Minas – *Campus* Formiga.

1. Linhas - transmissão. 2. Campo Magnético. 3. Análise  
Computacional. I. Título.

CDD 621.3

**PAULA CARVALHO RESENDE**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS NÍVEIS DE CAMPO MAGNÉTICO GERADOS  
POR LINHAS DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE:  
ESTUDO DE CASO SISTEMA FURNAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Nota: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Msc. Gustavo Lobato Campos - Orientador

---

Prof. Msc. Mariana Guimarães dos Santos - Membro

---

Prof. Msc. Ana Paula Lima dos Santos - Membro

Dedico este trabalho a minha madrinha,  
Heloísa, que antes de se tornar uma  
estrela no céu, sempre foi meu anjo na  
terra.

## RESUMO

Em países com dimensões continentais, como o Brasil, o principal meio de transporte de energia são as linhas de transmissão. Com o crescimento da população e o aumento pela demanda de energia, o número de linhas de transmissão vem aumentando no país. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (2014), estima-se que a extensão de linhas de transmissão maiores de 230 kV percorra, por todo o país, mais de 155.700 km até 2022. Devido à alta corrente, campos magnéticos são gerados na faixa de passagem das linhas de transmissão. E como cada vez, as linhas de transmissão passam nas proximidades dos centros urbanos e industriais, a preocupação em relação às interferências em sistemas eletrônicos e aos efeitos biológicos quanto à exposição a campos magnéticos vem crescendo. Alguns estudos relacionam a exposição aos campos magnéticos com o desenvolvimento de algumas patologias, como a leucemia infantil. Diante disso, esta monografia propõe a construção de uma ferramenta computacional para cálculo e análise dos campos magnéticos produzidos por linhas de transmissão operando em regime permanente. Para a construção do algoritmo computacional, primeiramente é feita a modelagem do campo magnético produzido por linhas de transmissão, considerando o efeito do solo. Posteriormente, para validar a ferramenta computacional, é feita a comparação das simulações com os estudos realizados nas literaturas da área. Após a validação, será feita a comparação das medições de duas linhas de transmissão do sistema de Furnas-MG, com dados obtidos por meio das simulações computacionais, considerando as modelagens apresentadas.

**Palavras chave:** Linhas de transmissão. Campo magnético. Análise computacional.

## ABSTRACT

In countries with continental dimensions such as Brazil, the principal medium of transporting energy is the transmission lines. With population growth and increased demand of energy, the number of transmission lines has been increasing over these years. According to the National Operator of the Brazilian Electric System (2014), it is estimated that the extension of transmission lines with voltage above 230 kV, all over the country, will be more than 155,700 kilometers in 2022. Due to the high current levels, magnetic fields are generated in the passband of the transmission lines. As a result, the transmission lines pass near urban and industrial centers, so the concern about interference in electronic systems and biological effects on exposure to magnetic field is growing. Some studies have linked exposure to magnetic fields with the development of some diseases, such as childhood leukemia. Therefore, this thesis proposes the construction of a computational tool that computes and carry out analysis of magnetic fields produced by power lines operating at steady state. For the construction of the computational algorithm, first of all, the magnetic field produced by transmission lines might be modeled, considering the effect of ground. Subsequently, to validate the computational tool is carried out a comparison between the simulations and the experiments conducted on the previously works. After complete the validation, it will be compared the measurements of two transmission lines of Furnas-MG system with data obtained through computer simulations, considering the presented model.

**Keywords:** Transmission lines. Magnetic field. Computational analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Integração Eletronergética Nacional. ....	13
Figura 2 - Esquema simples de um medidor com sonda tipo bobina. ....	22
Figura 3 - Medidor de campo magnético EFA 300-WG. ....	22
Figura 4 - Sistema monofásico para cálculo de campo magnético. ....	25
Figura 5 - Método das imagens para sistema trifásico. ....	26
Figura 6 - Método das imagens complexas para um sistema monofásico. ....	28
Figura 7 - Geometria da linha de transmissão 230 kV. ....	31
Figura 8 - Perfil de campo magnético obtido por medições. ....	32
Figura 9 - Perfil de campo magnético obtido pela ferramenta computacional desta monografia. ....	32
Figura 10 - Geometria da linha de transmissão de 500 kV. ....	33
Figura 11 - Perfil de campo magnético obtido por medições. ....	34
Figura 12 - Perfil de campo magnético obtido pela ferramenta computacional desta monografia. ....	34
Figura 13 - Configuração geométrica - 500 kV. ....	36
Figura 14 - Perfil de campo magnético obtido por medições. ....	37
Figura 15 - Perfil de campo magnético obtido pela ferramenta computacional desta monografia. ....	37
Figura 16 - Configuração geométrica - LT 63 kV. ....	38
Figura 17 - Perfis de campo magnético simulados por Nafar, 2013. ....	39
Figura 18 - Perfis de campo magnético obtidos pela ferramenta computacional desta monografia. ....	39
Figura 19 - Silhuetas dos sistemas analisados por Vieira (2013). ....	40
Figura 20 - Perfis de campo magnético simulados por Vieira (2013). ....	41
Figura 21 - Perfis de campo magnético obtidos pela ferramenta computacional desta monografia. ....	42
Figura 22 - Linhas de Transmissão sob estudo. ....	44
Figura 23 - Marcação dos pontos medidos. ....	45
Figura 24 - Detalhes das distâncias consideradas. ....	46
Figura 25 - Medições de campo magnético nas linhas LTFUES e LTFUMM. ....	48
Figura 26 – Perfis de campo magnético da medição e dos métodos de cálculos. ....	49



Figura 27 - Perfis de campo magnético variando a resistividade. ....52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Extensões em km das linhas de transmissão 2010 – 2014.....	15
Tabela 2 - Níveis de referência para público em geral .....	20
Tabela 3 - Níveis de referência para público ocupacional .....	21
Tabela 4 - Comparação entre os valores medidos por Ramírez (2001) e calculados nesta monografia – 230 kV .....	33
Tabela 5 - Comparação entre os valores medidos por Ramírez (2001) e calculados nesta monografia – 500 kV .....	35
Tabela 6 - Comparação entre os valores medidos por Guimarães (2005) e calculados nesta monografia.....	38
Tabela 7 - Comparação entre os valores computacionais de Nafar (2013) e calculados nesta monografia.....	40
Tabela 8 - Configurações elétricas e geométricas dos sistemas de Vieira (2013) ....	41
Tabela 9 - Comparação entre os valores computacionais de Vieira (2013) e calculados nesta monografia.....	42
Tabela 10 - Correntes da LTFUES nos dias e horários de medição .....	45
Tabela 11 - Correntes da LTFUMM nos dias e horários de medição .....	45
Tabela 12 - Características geométricas e elétricas LTFUES .....	47
Tabela 13 - Características geométricas e elétricas LTFUMM.....	47
Tabela 14 - Informações numéricas da Figura 26 referente aos campos magnéticos simulados e medidos.....	50
Tabela 15 - Diferença (%) entre valores medidos e os métodos de cálculo.....	51

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

BIG – Banco de Informações de Geração.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

ICNIRP – Comissão Internacional de Proteção Contra as Radiações Não Ionizantes.

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos.

LTFUES – Linha de Transmissão Sistema Furnas – Estreito.

LTFUMM – Linha de Transmissão Sistema Furnas – Mascarenhas de Moraes.

NBR – Norma Brasileira.

OMS – Organização Mundial de Saúde.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	12
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivos geral e específicos .....	16
1.3 Estrutura do Trabalho .....	16
2 LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	18
2.1 Conceitos básicos de linhas de transmissão .....	18
2.2 Recomendações e regulamentações sobre campos magnéticos para baixas frequências .....	19
2.3 Medições de campos magnéticos em linhas de transmissão .....	21
3 MODELAGEM DO CAMPO MAGNÉTICO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO ...	23
3.1 Premissas .....	23
3.2 Método analítico.....	24
3.3 Método das imagens.....	25
3.4 Método das imagens complexas.....	27
3.5 Densidade de fluxo magnético.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1 Comparação com resultados de medições divulgados na literatura.....	30
4.1.1 Comparação com medições: Ramírez, 2001 .....	30
4.1.2 Comparação com medições: Guimarães, 2005 .....	35
4.2 Comparação com resultados computacionais divulgados na literatura .....	38
4.2.1 Comparação com simulações computacionais: Nafar e outros, 2013.....	38
4.2.2 Comparação com simulações computacionais: Vieira, 2013 .....	40
4.3 Considerações finais sobre as comparações .....	43
4.4 Linhas de transmissão sob estudo – Estreito e Mascarenhas de Morais .....	43
4.4.1 Medição dos campos magnéticos – Estreito e Mascarenhas de Morais ...	43

4.4.2 Comparação dos valores medidos com os métodos de cálculo de campo magnético.....	48
4.4.3 Análise da sensibilidade do campo em relação à resistividade do solo ....	51
4.5 Publicações resultantes desta monografia .....	53
5 CONCLUSÃO.....	54
5.1 Trabalhos Futuros.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
ANEXO I.....	60

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência brasileiro é dividido em quatro principais segmentos conhecidos por geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia. O segmento de geração tem como responsabilidade produzir energia elétrica e prepará-la para o transporte (ABRADEE, 2016). Em 2014, o Brasil contava com 3.152 empreendimentos geradores segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2014). Já em 2016, os empreendimentos chegaram a 4.527 em operação, totalizando 144.757.996 kW de potência instalada (ANEEL, 2016b).

O segmento de transmissão é encarregado de transportar grandes quantidades de energia elétrica para consumidores de alta tensão e para o segmento de distribuição que por sua vez irá distribuir a energia de forma moderada para os consumidores médios e pequenos. O segmento de comercialização de energia elétrica está relacionado mais ao contexto institucional e econômico devido à reestruturação do setor elétrico. A ANEEL regula os preços dos segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia, assim, as empresas não são livres para praticar os preços que desejam. (ABRADEE, 2016)

Atualmente no Brasil, segundo dados do Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL, a matriz energética nacional predominante é a hidroeletricidade, com cerca de 61,2% da geração total (ANEEL, 2016a). Por isso, o fornecimento de energia depende diretamente do período chuvoso, que pode variar ao longo do ano. Além disso, as bacias hidrográficas brasileiras são distantes entre si, como mostra a Figura 1, em que estão instaladas as usinas hidrelétricas. Portanto, para que a energia produzida nos pontos de maior volume de chuvas possa ser utilizada em outras regiões, é importante que o sistema elétrico seja interligado por linhas de transmissão, que atravessam todo o país e são indispensáveis para o funcionamento do sistema elétrico de potência (CAMPOS, 2010).

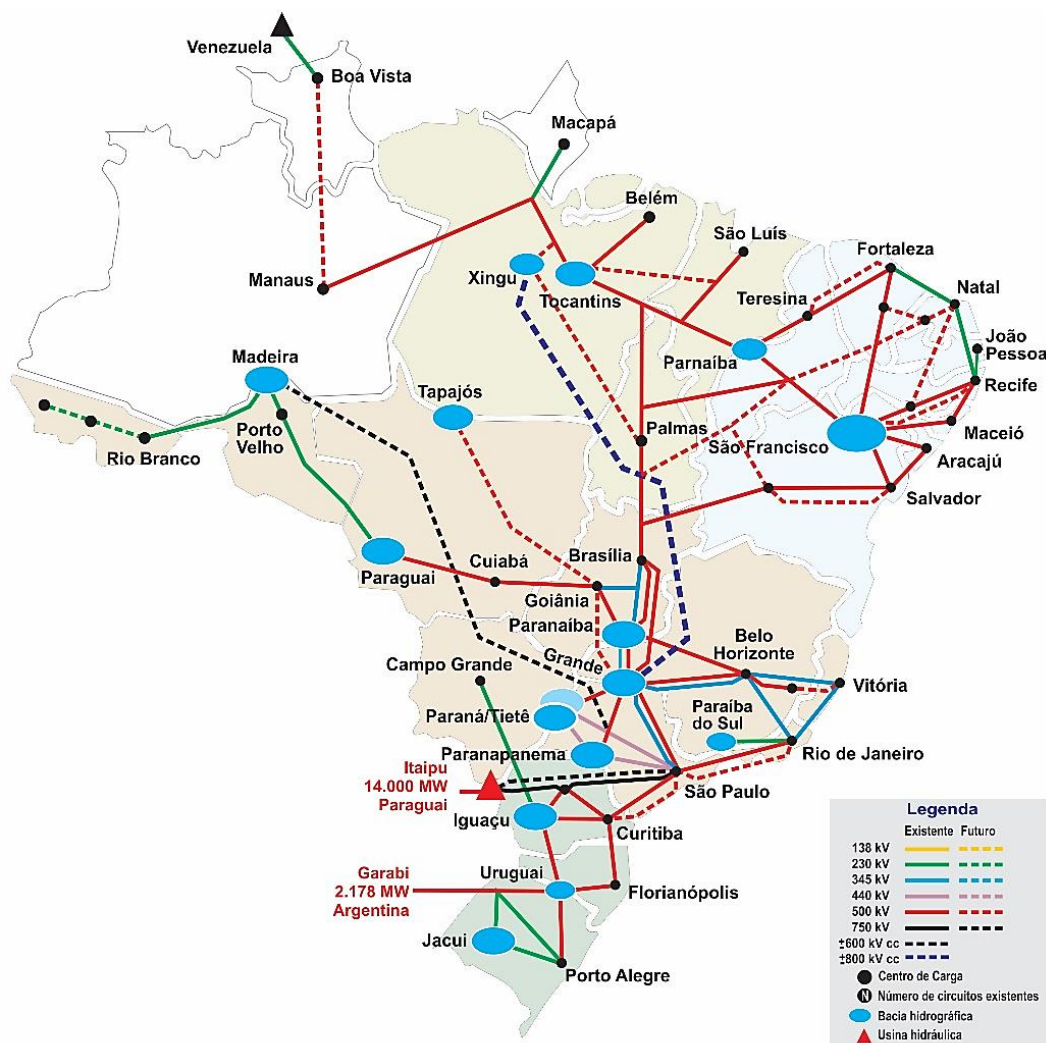


Figura 1 - Integração Eletronergética Nacional.  
Fonte: ONS, 2014b.

As linhas de transmissão são consideradas uma das principais fontes de campos eletromagnéticos. No entanto, devido a problemas geográficos, econômicos ou sociais tem-se algumas linhas de transmissão próximas a áreas residenciais, comerciais ou industriais, causando na comunidade local certa preocupação em relação às interferências em sistemas eletrônicos e aos efeitos biológicos quanto à exposição a campos elétricos e magnéticos. Tais campos eletromagnéticos ocorrem devido aos elevados níveis de corrente e tensão elétrica que passam pelas linhas de transmissão (COSTA; MONTEIRO, 2005).

Por isso, se faz necessário delimitar o espaço em torno da linha de transmissão. Esta delimitação é conhecida como faixa de passagem, ou seja, distância mínima de uma linha de transmissão necessária para assegurar a saúde e segurança das instalações próximas (CPFL, 2007).

Para analisar a interferência eletromagnética causada por linhas de transmissão, divide-se o regime de operação da linha em duas partes:

- Linha de transmissão em regime permanente: A frequência nesta operação é de 50 Hz – 60 Hz e o acoplamento eletromagnético pode ser dividido em dois: elétrico (capacitivo e condutivo) e magnético (indutivo). Devido à baixa frequência da linha, assume-se um comportamento linear do sistema e os acoplamentos podem ser calculados de forma independente.
- Linha de transmissão em regime transitório: Este tipo de operação ocorre em situações de curto circuito, operações de chaveamento, descargas atmosféricas, dentre outros. A frequência da linha pode variar de 60 Hz até 10 MHz, e por isso, o acoplamento eletromagnético não pode ser dividido e analisado de forma independente, pois a faixa de frequências é superior no espectro (SANTOS, 2011).

Nesta monografia opta-se por realizar o estudo das linhas de transmissão operando em regime permanente. Para que algum efeito sobre seres vivos e interferências em equipamentos eletrônicos seja notado a longo prazo, a exposição aos campos deve ser de forma contínua. A operação em regime transitório de uma linha de transmissão tem incidência relativamente baixa. Por isso, as análises serão feitas para a operação em regime permanente, ou seja, frequência de 50 Hz – 60 Hz.

Como citado anteriormente, na operação em regime permanente, o acoplamento eletromagnético pode ser dividido em elétrico e magnético e ambos serem estudados separadamente. Nesta monografia opta-se por analisar o acoplamento magnético, ou seja, a interferência magnética.

Por fim, para a obtenção dos resultados pretendidos, utiliza-se a modelagem do campo magnético que possibilita os cálculos dos níveis de campo próximos às linhas de transmissão. Para isso, supõe-se que a linha está operando em seu valor máximo, considerando o efeito do solo ou não, para verificar se os valores dos níveis de interferência magnética ultrapassam os valores limites estabelecidos pelas regulamentações em vigência.



## 1.1 Justificativa

A crescente demanda por energia elétrica, devido ao aumento populacional e desenvolvimento econômico, exige a modernização e expansão do sistema elétrico de potência.

Em 2014, o ONS disponibilizou os últimos dados sobre as extensões das linhas de transmissão por nível de tensão para os anos de 2010 a 2014, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Extensões em km das linhas de transmissão 2010 – 2014

Tensão	2010	2011	2012	2013	2014
<b>345kV CA</b>	10.060,50	10.061,90	10.223,90	10.272,30	10.303,20
<b>440kV CA</b>	6.670,50	6.680,70	6.728,20	6.728,20	6.728,20
<b>500kV CA</b>	34.356,20	35.003,40	35.726,20	39.123,10	40.659,40
<b>600kV CC</b>	3.224,00	3.224,00	3.224,00	7.992,00	12.816,00
<b>750kV CA</b>	2.683,00	2.683,00	2.683,00	2.683,00	2.683,00
<b>Total</b>	100.178,70	103.361,70	106.478,80	116.767,70	125.639,60

Fonte: ONS, 2014a.

Observa-se que a extensão das linhas de transmissão de 2010 a 2014 aumentaram 25,4% no seu total. Por isso, os órgãos ambientais e a população têm exigido maior segurança das instalações do sistema elétrico, pelo fato dos possíveis efeitos adversos causados pelos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão. Alguns estudos relacionam a exposição aos campos magnéticos com o desenvolvimento de patologias (SILVA, 2012).

Outros problemas são encontrados nas medições dos campos magnéticos. O operador fica exposto ao campo por um longo período, dependendo da extensão da linha de transmissão. Também há a dificuldade de chegar aos locais nos quais será feita a medição, uma vez que as linhas passam por rotas de difícil acesso (ABNT, 1985).

Desta forma, simulações computacionais para analisar campos magnéticos presentes em diferentes configurações de linhas de transmissão são instrumentos que ajudam e facilitam na verificação dos níveis de campos a fim de garantir segurança para as pessoas e para as instalações próximas das linhas de transmissão.

## 1.2 Objetivos geral e específicos

O objetivo geral desta monografia é calcular os níveis de campo magnético produzidos por linhas de transmissão operando em regime permanente, ou seja, com frequência entre 50 Hz – 60 Hz por meio de simulação computacional.

Para consolidar o objetivo geral, alguns objetivos específicos devem ser alcançados sequencialmente, sendo apresentados a seguir:

- Modelagem do campo magnético para linhas de transmissão. Nesta etapa, considera-se o efeito do solo modelado pelo plano complexo de retorno de Deri (1981).
- Comparação das simulações com os estudos realizados nas literaturas da área, para validar os cálculos obtidos por meio do programa computacional.
- Análises de sensibilidade de duas linhas de transmissão de Furnas-MG, comparando as medições das linhas com os cálculos simulados, considerando as modelagens apresentadas.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Esta monografia é constituída por cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo corresponde à introdução do tema. Além disso, apresenta a justificativa do tema, os objetivos a serem atingidos e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo consiste na introdução de alguns assuntos necessários para o entendimento no decorrer do trabalho, como conceitos básicos de linhas de transmissão, as normas e recomendações nacionais e internacionais sobre campos magnéticos e por fim, medições de campo magnético.

O terceiro capítulo traz a modelagem dos campos magnéticos que será implementada por meio de uma ferramenta computacional para análises posteriores. Os métodos utilizados para a modelagem são: método analítico; método das imagens, que considera o solo como condutor perfeito (resistividade = 0); e o método das imagens complexas, em que é considerado o efeito do solo (resistividade  $\neq 0$ ).

No quarto capítulo, é apresentada a validação da ferramenta computacional por meio de comparações com literaturas da área. Também é feita uma análise de duas linhas de transmissão na região da Usina Hidrelétrica de Furnas-MG, comparando os valores de campo medidos com os métodos de cálculo demonstrados nesta monografia e uma análise da sensibilidade do campo magnético em relação ao solo.

Por fim, no capítulo cinco são descritas as conclusões finais, bem como propostas de continuidade do tema apresentado.

## **2 LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Alguns estudos prévios referentes às linhas de transmissão são importantes para o entendimento dos conceitos e análises realizadas no decorrer do trabalho. Por isso, este capítulo apresenta os conceitos básicos de linhas de transmissão e demonstra alguns estudos referentes às recomendações e normas vigentes que regulamentam a exposição a campos magnéticos na frequência industrial. Este capítulo também contém algumas instruções de medições de campos magnéticos mencionadas nas normas e bibliografias da área.

### **2.1 Conceitos básicos de linhas de transmissão**

A principal função de um sistema de transmissão é a transferência de energia elétrica das usinas de geração até os centros de carga. As grandes unidades geradoras em conjunto com uma rede de transmissão permitem não somente o envio econômico de energia durante as condições normais de funcionamento, mas também a transferência de energia em situações de falta ou emergências. Por isso é tão importante a interconexão do sistema de potência. (LAFOREST, 1981).

As linhas de transmissão de energia elétrica são compostas pelas estruturas das linhas e equipamentos associados. Entre os equipamentos básicos estão os cabos condutores, isoladores, as estruturas de suporte, já mencionadas, e os para-raios (LAFOREST, 1981; GLOVER, 2012).

Os cabos condutores de alumínio são comumente utilizados nos dias de hoje e vêm substituindo os cabos de cobre. Apesar do diâmetro dos condutores de alumínio ser maior, para compensar as perdas, o preço do alumínio é inferior ao cobre, são mais leves e encontrados em abundância na natureza. Os cabos para-raios também são feitos de alumínio com diâmetro um pouco inferior, localizados acima dos cabos condutores, para proteção contra descargas atmosféricas e seu número depende da estrutura da torre, para proteção total de todos os componentes (GLOVER, 2012).

As estruturas de suporte das linhas de transmissão variam de acordo com a tensão de operação. Por exemplo, os condutores de fase podem ser dispostos tanto

numa configuração triangular para minimizar a altura da torre ou numa configuração vertical para reduzir a largura da torre. Por isso, há uma variedade de estruturas de suporte (GLOVER, 2012).

Os isoladores consistem em uma série de discos podendo ser de porcelana, polímero ou vidro temperado. O número de discos isoladores em sequência aumenta com a tensão da linha de transmissão (GLOVER, 2012).

Além do dimensionamento de todos os componentes citados acima, para o planejamento de uma nova linha de transmissão outros aspectos importantes devem ser considerados como:

- Fluxo de potência;
- Fatores econômicos;
- Estabilidade da linha;
- Capacidade de intercâmbios;
- Confiabilidade;
- Impacto ambiental.

De fato, o planejamento é necessário não só para atender as necessidades a curto prazo, mas também para desenvolver um plano viável para a evolução do sistema de transmissão no futuro. Por isso, ao fim do projeto de uma linha de transmissão, espera-se conseguir a transferência de potência desejada de forma confiável e com melhor custo-benefício, sem causar impactos ambientais e/ou socioeconômicos (LAFOREST, 1981).

## **2.2 Recomendações e regulamentações sobre campos magnéticos para baixas frequências**

As recomendações internacionais mais referenciadas e utilizadas foram produzidas pela Comissão Internacional de Proteção Contra as Radiações Não Ionizantes (ICNIRP) e pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE).

A ICNIRP é uma organização independente, reconhecida mundialmente que visa limitar a exposição de seres humanos a campos elétricos e magnéticos, com base em estudos epidemiológicos, a fim de proteger contra os efeitos diretos e indiretos

causados à saúde. Os valores limites estabelecidos pela ICNIRP são reconhecidos e recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

O IEEE é um órgão profissional sem fins lucrativos fundado nos Estados Unidos, dedicado ao avanço da tecnologia para benefício da humanidade. O documento IEEE Std C95.6 de 2002 padroniza os níveis de exposição humana a campos eletromagnéticos para frequências entre 0 – 3 kHz.

No Brasil, a NBR 5422 de 1985, sobre Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, estabelece que o valor do campo elétrico ao nível do solo não deve ultrapassar 5 kV/m na faixa de passagem, porém não nivela os campos magnéticos. Por isso, criou-se em 2006, a NBR 15415, para especificar os métodos de medição e os níveis de exposição a campos elétricos e magnéticos para frequências de 50 Hz a 60 Hz. Como atualização da norma, a Lei Federal 11.934/09 e a Resolução Normativa 398 da ANEEL foram criadas a fim de estabelecer limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos para o público geral e público ocupacional.

As Tabelas 2 e 3 apresentam respectivamente os resumos dos valores limites de exposição de seres humanos a campos magnéticos das regulamentações internacionais e nacionais, para público geral e ocupacional. Segundo Resolução Normativa 398 da ANEEL, a população ocupacional compreende adultos geralmente expostos a campos eletromagnéticos em condições conhecidas, em função da atividade ocupacional. Entende-se com público em geral, os indivíduos de todas as idades e em qualquer condição de saúde não integrantes da população ocupacional.

Tabela 2 - Níveis de referência para público em geral

<b>Público em geral</b>				
<b>Órgão Regulamentador</b>	ICNIRP	IEEE	NBR 15415	ANEEL
<b>Densidade de Fluxo Magnético (<math>\mu\text{T}</math>)</b>	83,33	904	83,33	200

Fontes: ICNIRP, 1998; IEEE, 2002; ABNT, 2006; ANEEL, 2010.

Tabela 3 - Níveis de referência para público ocupacional

Público Ocupacional				
Órgão Regulamentador	ICNIRP	IEEE	NBR 15415	ANEEL
Densidade de Fluxo Magnético ( $\mu\text{T}$ )	416,6	2712	----	1000

Fontes: ICNIRP, 1998; IEEE, 2002; ABNT, 2006; ANEEL, 2010.

Vale ressaltar que estes dois grupos são divididos pelo fato da população ocupacional ser treinada, ter consciência do risco potencial para tomar precauções apropriadas quando necessário. A população em geral, em sua maioria, não possui conhecimentos dos efeitos da exposição dos campos magnéticos e como evitar ou minimizar tal exposição (ABNT, 2006).

### 2.3 Medições de campos magnéticos em linhas de transmissão

No Brasil, a norma NBR 15415, fornece instruções para medição dos valores eficazes de campo magnético para frequências entre 50 Hz – 60 Hz. Ela utiliza como referência a norma internacional IEEE Std 644 de 1994. A NBR 15415 estabelece algumas especificações de instrumentos para realizar medições de campos elétricos e magnéticos alternados, a calibração desses instrumentos, as incertezas nas medições e como registrar e reportar os resultados medidos.

No procedimento de medição de campo magnético, deve ser realizada uma medição de densidade de fluxo magnético da instalação, preferencialmente no período de maior carregamento. No caso de várias medições, adotar o maior valor. Para linhas de transmissão, a medição deve ser no limite da faixa de segurança a uma altura de 1,5 m do solo, transversalmente ao eixo da linha, no ponto de menor distância entre o condutor da fase e o solo. Algumas características dos campos como variações temporais, variações espaciais, entre outras, devem ser avaliadas caso haja alguma necessidade específica da medição (ABNT, 2006).

Os medidores de campos magnéticos podem ser divididos em duas partes: o elemento sensor de campo, conhecido como sonda e o detector que processa o sinal da sonda. O valor do campo magnético é indicado em um display digital ou analógico.

A Figura 2 mostra o esquema de um medidor simples com sonda tipo bobina e a Figura 3 o medidor utilizado nas medições desta monografia.

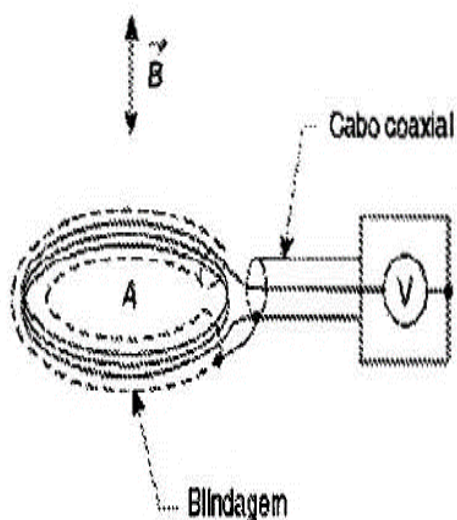


Figura 2 - Esquema simples de um medidor com sonda tipo bobina.  
Fonte: ABNT, 2006.



Figura 3 - Medidor de campo magnético EFA 300-WG.  
Fonte: NARDA, 2016.

Segundo a NBR 15415, o princípio de operação do medidor de campo magnético baseado na Figura 2 é fundamentado na Lei de Faraday, sendo a taxa de variação de fluxo  $\Phi$  em relação ao tempo é igual a tensão  $V$  gerada no terminal de um laço de fio aberto, como dado na Equação 1:

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[ \int_A B \times n \times dA \right] \quad (1)$$

Na qual:  $B$  é o vetor densidade do fluxo magnético;

$n$  é o vetor unitário perpendicular à área do laço;

$dA$  é um elemento da área.



### 3 MODELAGEM DO CAMPO MAGNÉTICO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para iniciar a construção da ferramenta computacional é preciso conhecer os modelos matemáticos de campos magnéticos disponíveis na literatura. Há várias modelagens apresentadas por diversos autores. Nesta monografia optou-se por escolher os métodos frequentemente utilizados em pesquisas da área.

Porém, antes da modelagem do campo magnético é necessário estabelecer algumas premissas pertinentes dos problemas eletromagnéticos. As análises de campo que serão apresentadas no decorrer do trabalho estão de acordo com as premissas mencionadas no tópico a seguir. Posteriormente, serão demonstradas as modelagens de campos magnéticos em linhas de transmissão.

#### 3.1 Premissas

Para a análise de linhas de transmissão, algumas características que não ocorrem na prática devem ser consideradas. É evidente, que na maioria das modelagens eletromagnéticas há aproximações matemáticas e físicas. Por isso, as linhas de transmissão aéreas são consideradas trifásicas, simétricas e balanceadas para os cálculos. Ou seja, elas operam em regime permanente, a tensão de operação tem mesma amplitude para as três fases e defasagem de  $120^\circ$  entre elas e a sequência de fase A-B-C.

Nos cálculos de campo magnético é necessário conhecer as correntes de cada fase da linha de transmissão. Entretanto, não é possível estabelecer um valor exato de corrente em uma linha. Ela varia de acordo com a carga demandada pelos usuários da linha de transmissão. Assim, a corrente utilizada para os cálculos será a corrente média, considerando o período das medições.

No procedimento de cálculo de campo magnético não são consideradas as correntes dos cabos para-raios, uma vez que as mesmas podem ser desprezadas por serem pequenas correntes induzidas e estarem mais distantes do solo que os cabos condutores (GUIMARÃES, 2005).

Basicamente, estas são as premissas de âmbito geral para iniciar o estudo das modelagens dos campos magnéticos. As considerações específicas de determinada modelagem serão referidas e comentadas quando necessário.

### 3.2 Método analítico

Todas as modelagens utilizadas nesta monografia partiram da Lei de Ampère mostrada na Equação 2, que diz:

A lei circuital de Ampère estabelece que a integral de linha da componente tangencial de  $H$  em torno de um caminho fechado é igual à corrente líquida  $I_{env}$  envolvida pelo caminho (Sadiku, 2012, p. 253).

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \int_S \vec{J}_C \cdot d\vec{S} = I_{env} \quad (2)$$

Devido ao comprimento da linha de transmissão ser da ordem de centenas de quilômetros, pode-se aproximar os condutores com comprimentos que tendem ao infinito (VIEIRA, 2013). Assim, considerando a distância vertical entre o ponto da fonte de campo e o ponto de observação constante,  $\rho$ , a Equação 2 pode ser reduzida para Equação 3 (SADIKU, 2012):

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi\rho} \hat{a}_\phi \quad (3)$$

Sendo  $I$  é a corrente que percorre a linha de transmissão e  $\hat{a}_\phi$  é o produto vetorial entre o vetor de corrente  $\hat{a}_L$  e o vetor posição  $\hat{a}_\rho$ , mostrado na Equação 4, que indica o sentido e direção do campo magnético no ponto de observação.

$$\hat{a}_\phi = \hat{a}_L \times \hat{a}_\rho \quad (4)$$

A Figura 4 ilustra um sistema monofásico em que é aplicada a Lei de Ampère considerando um condutor infinito.

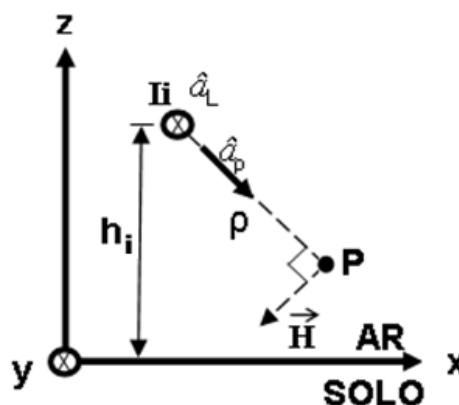


Figura 4 - Sistema monofásico para cálculo de campo magnético.  
Fonte: VIEIRA, 2013.

A Equação 3 somente é válida para o cálculo do campo magnético gerado por uma linha imersa em um único meio, neste caso, o ar. Porém, o solo também tem influência no campo magnético e a inclusão é feita pela aplicação do método das imagens. Esse método é usado para representar as correntes que penetram no solo, as quais influenciam os valores do campo magnético no ponto de observação.

### 3.3 Método das imagens

O método das imagens estabelece que uma corrente acima de um meio considerado um condutor perfeito, ou seja, sua condutividade tende ao infinito ( $\sigma \rightarrow \infty$ ), induz uma corrente no sentido oposto localizada simetricamente a sua imagem (ZAHN, 2003).

A Figura 5 representa o método das imagens para um sistema trifásico. Pode-se notar que os meios se tornam um sistema único pelo fato dos dois serem considerados meios infinitos. Além disso, o sentido da corrente de imagem é oposto para compensar a mudança do campo magnético na fronteira ar-solo (VIEIRA, 2013).

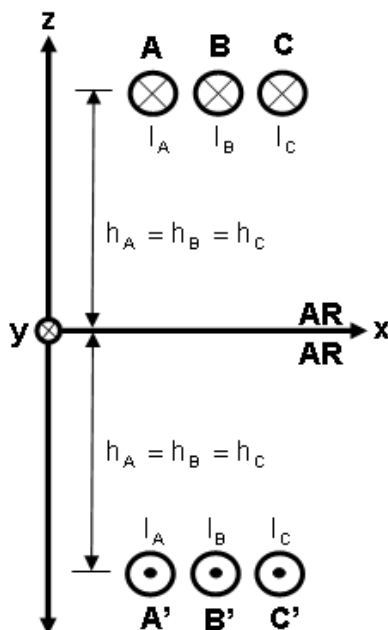


Figura 5 - Método das imagens para sistema trifásico.  
Fonte: VIEIRA, 2013.

Partindo do mesmo princípio do método analítico, considerando os condutores com comprimentos infinitos, o campo magnético resultante no ponto de observação é a superposição dos campos magnéticos gerados pelas correntes reais e as correntes das imagens de cada fase. Assim, o campo magnético total para método das imagens pode ser representado pela Equação 5.

$$\vec{H}_T = \sum_{I=1}^N \frac{I}{2\pi\rho_R} \hat{a}_{\phi R} + \sum_{I=1}^N \frac{I}{2\pi\rho_I} \hat{a}_{\phi I} \quad (5)$$

Sendo  $N$  é o número de condutores fases na linha de transmissão e os sufixos "R" representam os componentes do circuito real e "I" a imagem do circuito real.

Por outro lado, seria mais adequado a inserção do efeito do solo com uma condutividade finita nas expressões de campo magnético. Há várias modelagens nas quais é incluído o efeito do solo nesta condição. O método das imagens complexas criado por Deri (1981) inclui o efeito do solo por meio de um plano de retorno complexo. A modelagem de Deri (1981) é simples e apresenta resultados muito semelhantes a outros métodos em que é feita a inserção do solo (VIEIRA, 2013).

### 3.4 Método das imagens complexas

O método das imagens complexas consiste na concepção de um plano complexo de retorno de corrente pelo solo, com condutividade infinita e situado abaixo do solo, a uma distância igual à penetração complexa “ $p$ ” (SANTIAGO, 2009).

A Equação 6 é a formulação proposta por Deri e outros (1981), para o cálculo da profundidade complexa  $p$ .

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_S + j\omega\varepsilon_S)}} \quad (6)$$

Na qual:

$\omega$  - Frequência angular em  $\frac{rad}{s}$ ;

$\mu_0$  - Permeabilidade magnética do vácuo igual a  $4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$ ;

$\sigma_S$  - Condutividade do solo em  $\frac{S}{m}$ ;

$\varepsilon_S$  - Permissividade elétrica do solo em  $\frac{F}{m}$ .

Como já citado, as análises de campo magnético são feitas em regime permanente, 50 Hz - 60 Hz. Estudos realizados por Gertrudes (2005; 2010) e Vieira (2013) para baixas frequências, informam que a Equação 6 pode ser reduzida para a Equação 7. Segundo os autores, a redução da Equação 6 é fisicamente consistente e praticamente não influencia no cálculo dos parâmetros longitudinais de linhas de transmissão.

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_S}} = \sqrt{\frac{\rho_S}{j\omega\mu_0}} \quad (7)$$

O método das imagens complexas para um sistema monofásico é mostrado na Figura 6. Pode-se observar que o plano da corrente de imagem, neste método, considera o valor da profundidade complexa.

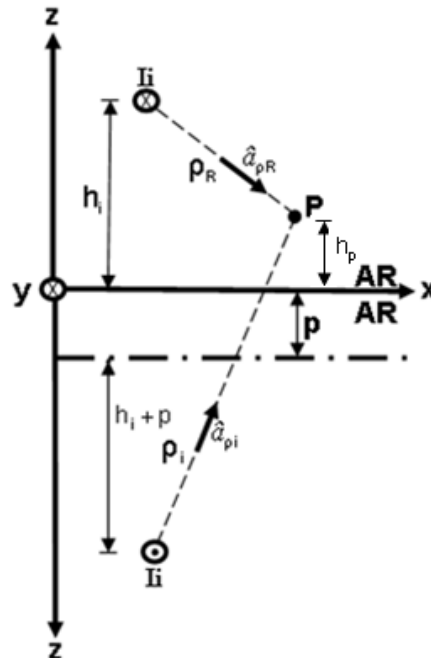


Figura 6 - Método das imagens complexas para um sistema monofásico.  
Fonte: VIEIRA, 2013.

Deste modo, o cálculo final do campo magnético para o método das imagens complexas terá alterações somente nas distâncias entre o ponto de observação e os pontos de fonte de campo, devido à inserção da profundidade complexa “ $p$ ”. Logo, a Equação 8 mostra a expressão final do campo magnético.

$$\vec{H}_T = \sum_{i=1}^3 \frac{I_i}{2\pi(\rho_{Ri})^2} (h_p - h_i, 0, x_i - x_p) + \sum_{i=1}^3 \frac{I_i}{2\pi(\rho_{Ii})^2} (-h_p - h_i - 2p, 0, x_p - x_i) \quad (8)$$

Sendo  $I_i$  corresponde as correntes de fase de cada condutor da linha de transmissão;  $h_i$  é a altura do  $i$ -ésimo condutor da  $i$ -ésima corrente;  $h_p$  é altura do ponto de observação do campo em relação ao solo;  $x_i$  e  $x_p$  são, respectivamente, as posições horizontais do  $i$ -ésimo condutor e do ponto de observação;  $\rho_R$  e  $\rho_I$  são as distâncias verticais (real e imagem) entre o ponto da fonte e o ponto de observação do campo.

### 3.5 Densidade de fluxo magnético

O campo magnético total de uma linha de transmissão é o módulo dos campos magnéticos gerados pelos componentes nos eixos x e z, como representados nas Figuras 4, 5 e 6. A Equação 9 apresenta o cálculo do campo magnético total.

$$\vec{H}_T = \sqrt{H_x^2 + H_z^2} \quad (9)$$

Em que:

$H_x$  é o módulo dos campos magnéticos gerados no eixo x;

$H_z$  é o módulo dos campos magnéticos gerados no eixo z.

Vale citar que as equações apresentadas até agora são para campo magnético  $\vec{H}$ , na qual a unidade de medida é  $A/m$ . Entretanto, as medições e análises são realizadas em densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$ , dado em Tesla. Portanto, a Equação 10 determina a relação entre campo magnético  $\vec{H}$  e densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$ .

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (10)$$

Sendo  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo. Desta forma, com todas as modelagens de campo magnético determinadas, é possível construir a ferramenta computacional.

Para validar a ferramenta computacional construída, é feita a comparação dos resultados obtidos com os resultados das literaturas da área. Após a validação, as linhas de transmissão sob estudo serão analisadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após as definições dos métodos matemáticos para o cálculo dos campos magnéticos, foi desenvolvido em Matlab® um algoritmo computacional para calcular campos magnéticos produzidos por linhas de transmissão. O fluxograma da ferramenta computacional simplificado se encontra no Anexo I. Portanto, é crucial confirmar a veracidade e a confiabilidade dos resultados da ferramenta computacional. Para isso, os resultados foram comparados com os resultados computacionais e medições de campos magnéticos, disseminados na literatura atual.

Para determinar a diferença percentual dos cálculos computacionais e os resultados disseminados na literatura da área e validar os resultados, utiliza-se a Equação 11 (VIEIRA, 2013).

$$Diferença (\%) = \left( \frac{V_{referência} - V_{análise}}{V_{análise}} \right) \cdot 100\% \quad (11)$$

Em que  $V_{referência}$  é o valor utilizado como base e  $V_{análise}$  é o valor do parâmetro em comparação.

Tal validação é apresentada por meio de gráficos e tabelas como forma de comparação de alguns valores importantes, tais como, o valor máximo de campo magnético e sua posição. Posteriormente, será feita a análise das sensibilidades das linhas de transmissão sob estudo que serão mencionadas nos tópicos a seguir.

### 4.1 Comparação com resultados de medições divulgados na literatura

#### 4.1.1 Comparação com medições: Ramírez, 2001

Em março de 2001, Jaime Arturo Ramírez realizou um estudo sobre campos eletromagnéticos devido a sistemas de energia elétrica. Os resultados foram divididos em duas partes: a primeira referente ao cálculo e medição do campo magnético para



linhas de transmissão e distribuição típicas de Minas Gerais e a segunda parte refere-se a um estudo laboratorial para investigar os possíveis efeitos biológicos de campos magnéticos.

A primeira linha de transmissão para comparação estudada pelo autor opera em  $230\text{ kV}$ , é do tipo vertical, trifásica e corrente de operação de  $160\text{ A}$ . A Figura 7 ilustra a configuração geométrica da linha.

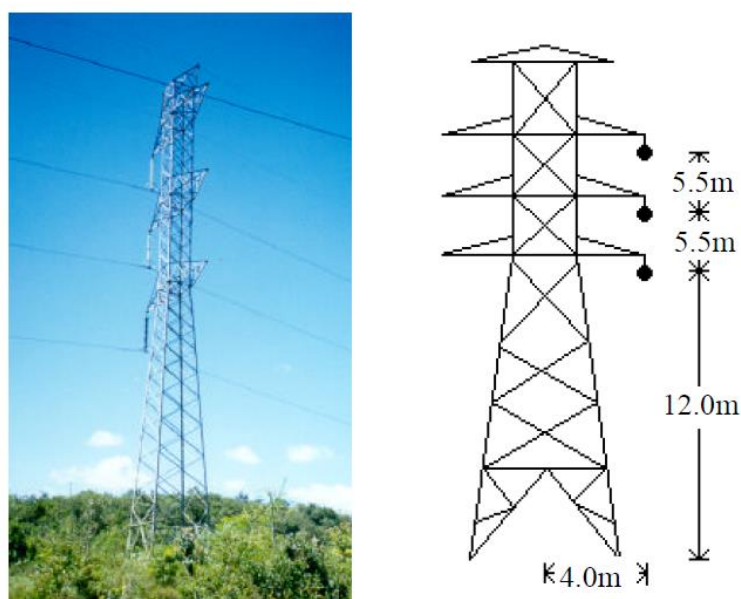


Figura 7 - Geometria da linha de transmissão  $230\text{ kV}$ .  
Fonte: RAMIRÉZ, 2001.

O centro da estrutura é adotado como eixo de simetria e as fases estão a uma distância de  $4\text{ m}$  do eixo. Segundo o autor, as alturas cabo-solo, mostradas na Figura 7, foram definidas como as encontradas no local da medição, que na maioria das vezes não corresponde à altura estrutural do condutor na torre. As medições foram realizadas do eixo da torre até aproximadamente  $35\text{ m}$  de distância, a  $1\text{ m}$  de altura. As Figuras 8 e 9 ilustram, respectivamente, os valores de medição de Ramírez (2001) e os cálculos obtidos a partir da ferramenta computacional desta monografia.

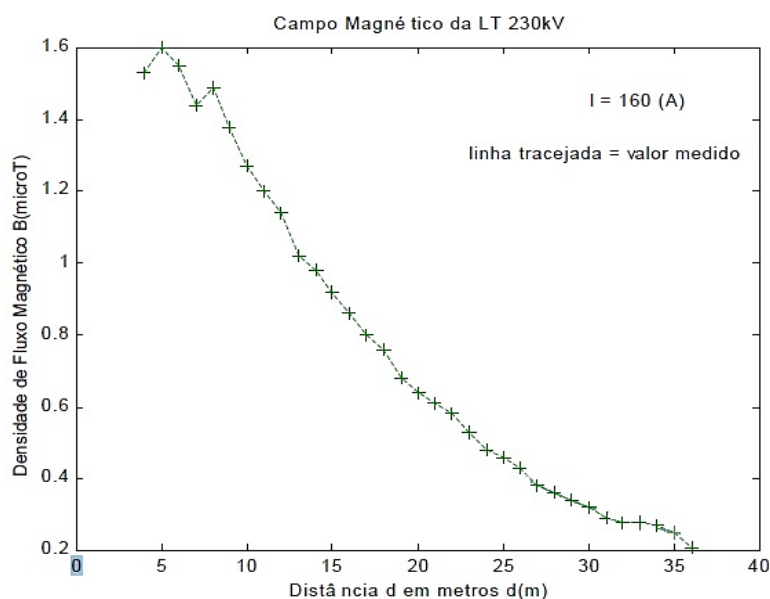


Figura 8 - Perfil de campo magnético obtido por medições.  
Fonte: Adaptado, RAMIRÉZ, 2001.

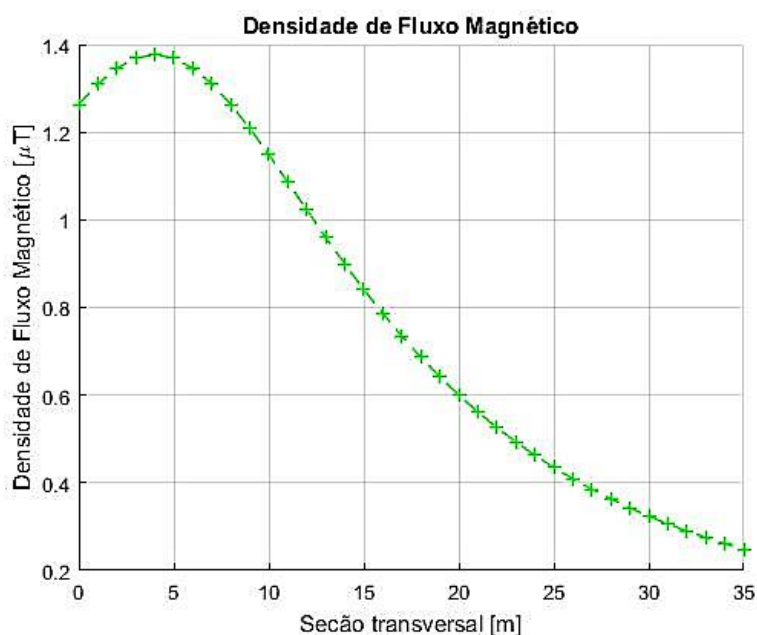


Figura 9 - Perfil de campo magnético obtido pela ferramenta computacional desta monografia.  
Fonte: Acervo da autora, com o uso do Matlab®.

Os pontos que merecem mais atenção nas análises são os de maior valor e os limites laterais, em que são posicionados nas extremidades da faixa de passagem. Nos valores medidos por Ramírez (2001), o valor máximo de  $1,6 \mu T$  está na posição  $5 m$ . O valor máximo calculado pela ferramenta computacional está posicionado em  $4 m$  com valor de  $1,377 \mu T$ . Os valores no limite de  $35 m$  são praticamente iguais para

a medição e o cálculo, com diferença de apenas  $-0,8\%$ . A Tabela 4 demonstra algumas comparações entre os valores de medição e de cálculo.

Tabela 4 - Comparação entre os valores medidos por Ramírez (2001) e calculados nesta monografia – 230 kV

Posição (m)	Medição ( $\mu\text{T}$ )	Cálculo ( $\mu\text{T}$ )	Diferença %
4	1,53	1,377	-10
35	0,25	0,248	-0,8

É possível verificar que há uma grande proximidade entre os valores medidos e calculados, assim como similaridade no comportamento das curvas. Assim, conclui-se que a ferramenta computacional tem resultado satisfatório.

A segunda linha de transmissão utilizada para comparação de Ramírez (2001) possui tensão de operação de  $500\text{ kV}$  e corrente de operação de  $590\text{ A}$ . A Figura 10 ilustra a configuração geométrica da linha. Tal configuração é típica da linha São Gotardo II/Neves – MG.

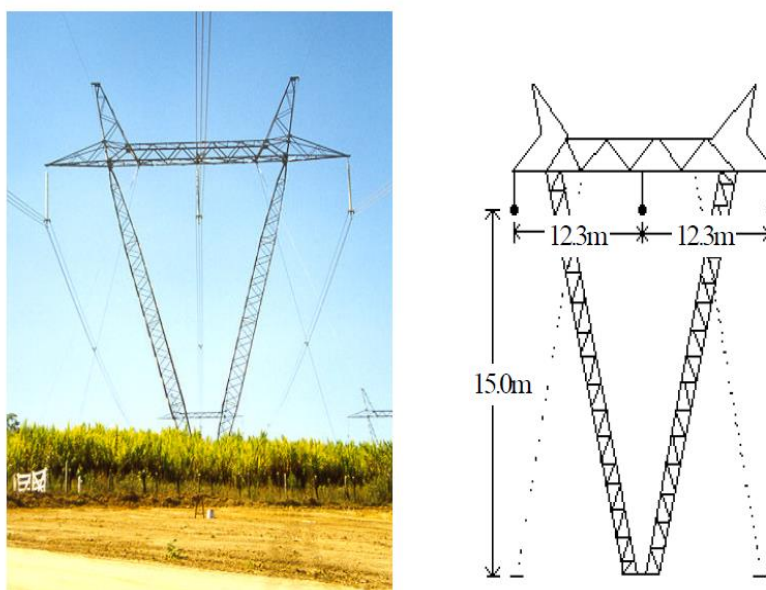


Figura 10 - Geometria da linha de transmissão de 500 kV.

Fonte: RAMIRÉZ, 2001.

A fase B, no centro da estrutura, é adotada como eixo de simetria e as fases A e C estão a uma distância de  $12,3\text{ m}$  do eixo. Segundo o autor, as alturas cabo-solo, mostradas na Figura 10, foram definidas como as encontradas no local da medição, que na maioria das vezes não corresponde à altura estrutural do condutor na torre. As

medições foram realizadas do eixo da torre até aproximadamente 40 m de distância, a 1 m de altura. As Figuras 11 e 12 ilustram, respectivamente, os valores de medição de Ramírez (2001) e os cálculos obtidos a partir da ferramenta computacional desta monografia.

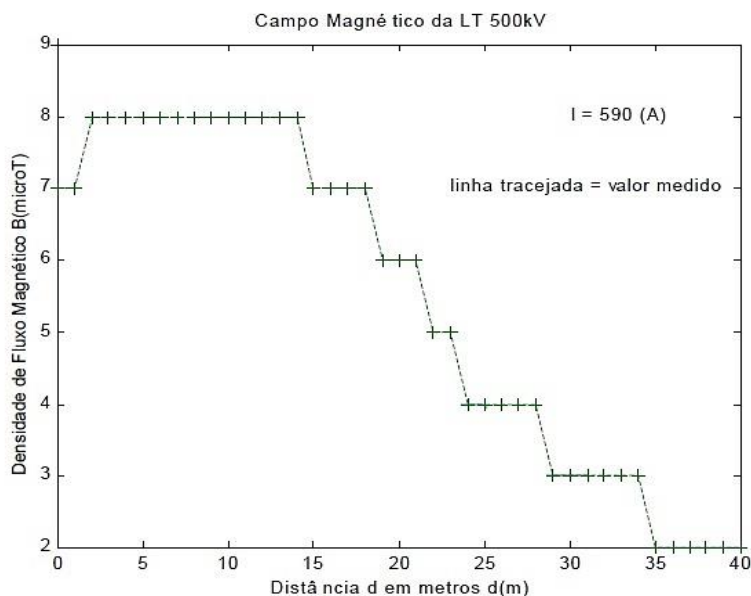


Figura 11 - Perfil de campo magnético obtido por medições.  
Fonte: Adaptado, RAMIRÉZ, 2001.

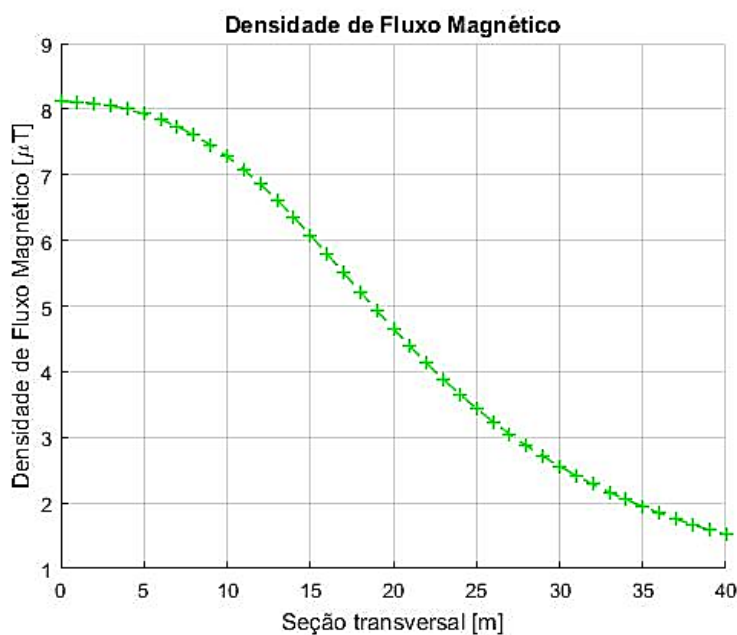


Figura 12 - Perfil de campo magnético obtido pela ferramenta computacional desta monografia.

Fonte: Acervo da autora, com o uso do Matlab®.

Analisando os gráficos, percebe-se que os valores máximos de campo são muito próximos,  $8 \mu T$  na medição e  $8,11 \mu T$  no cálculo, porém com uma pequena diferença na posição, na qual a medição está em  $2 m$  e o cálculo na posição de  $0 m$ . A Tabela 5 demonstra algumas comparações entre os valores de medição e de cálculo.

Tabela 5 - Comparação entre os valores medidos por Ramírez (2001) e calculados nesta monografia – 500 kV

Posição (m)	Medição ( $\mu T$ )	Cálculo ( $\mu T$ )	Diferença %
0	7	8,11	15,85
40	2	1,517	-24,15

Há uma diferença relativamente alta entre os valores absolutos de campo magnético medidos e calculados da Tabela 5. Tal diferença pode acontecer devido a fatores externos que aumentam a imprecisão no momento da medição. A corrente que circula na linha de transmissão varia muito durante o dia, pois depende da demanda de carga da mesma. Por isso, não se tem um valor exato de corrente e este fator pode causar diferença entre as medições e os cálculos de campo magnético. Fatores como a temperatura e a umidade no momento da medição também podem alterar os valores finais de campo magnético. Contudo, o comportamento das curvas é similar e os valores máximos de campo magnético medidos e calculados são próximos, o que é relevante para a validação do programa computacional.

#### 4.1.2 Comparação com medições: Guimarães, 2005

Em 2005, Gernan Edson Guimarães realizou um estudo sobre campos eletromagnéticos em uma linha de transmissão de  $500 kV$ , conhecida como Neves 1-Vespasiano 2, operando em  $60 Hz$ . Neste estudo, o autor efetuou várias medições de campo magnético e elétrico. A estrutura da torre é horizontal, trifásica e com corrente de operação de  $650 A$ . A Figura 13 ilustra a configuração geométrica da linha.

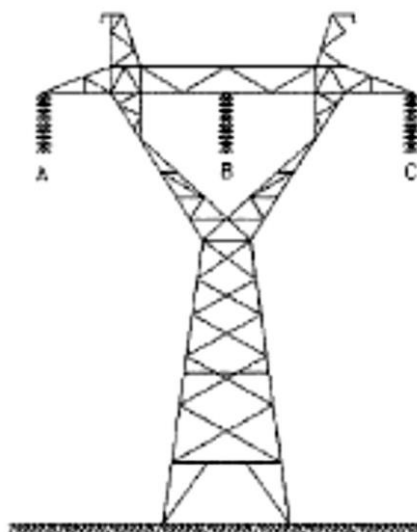


Figura 13 - Configuração geométrica - 500 kV.  
Fonte: GUIMARÃES, 2005.

Nesta configuração, a fase B é adotada como eixo de simetria, e as fases A e C estão espaçadas da fase B em 12 m. O relevo na localização da linha é irregular, logo as alturas dos condutores de fase estão a uma distância máxima de 25,26 m e mínima de 10,86 m do solo.

As medições realizadas pelo autor seguem as recomendações da norma IEEE Std 644-1994, em que são especificados os procedimentos de medição de campo magnético para baixa frequência. As medições foram feitas a 1 m de altura, com seção transversal de 40 m para cada lado da linha. A resistividade utilizada na simulação é de 2400  $\Omega \cdot m$ , valor que segundo Vieira (2013) é o médio no estado de Minas Gerais.

Deste modo, foi realizada a simulação com os valores mencionados acima a fim de validar a ferramenta computacional comparando com as medições do autor. As Figuras 14 e 15 ilustram, respectivamente, os valores de medição de Guimarães (2005) e os cálculos obtidos a partir da ferramenta computacional desta monografia.

Perfil Transversal da Densidade de Fluxo Magnético

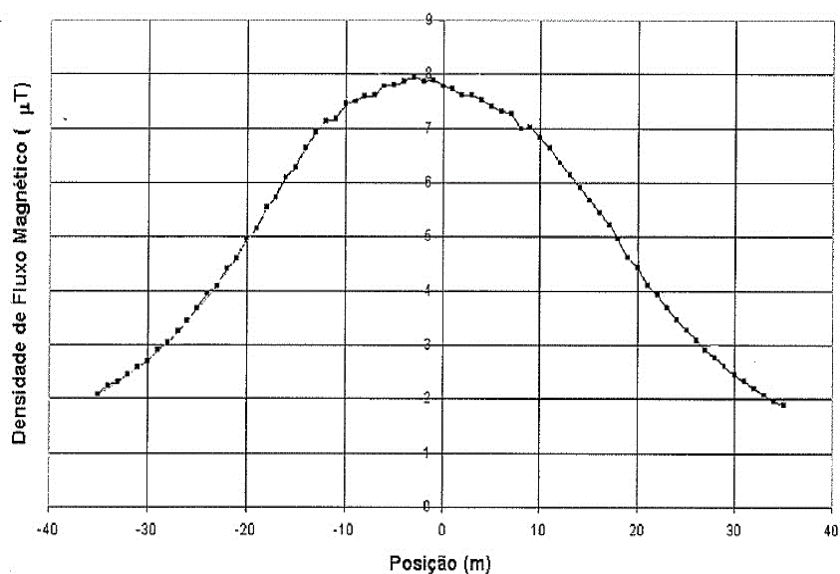


Figura 14 - Perfil de campo magnético obtido por medições.  
Fonte: Adaptado, GUIMARÃES, 2005.

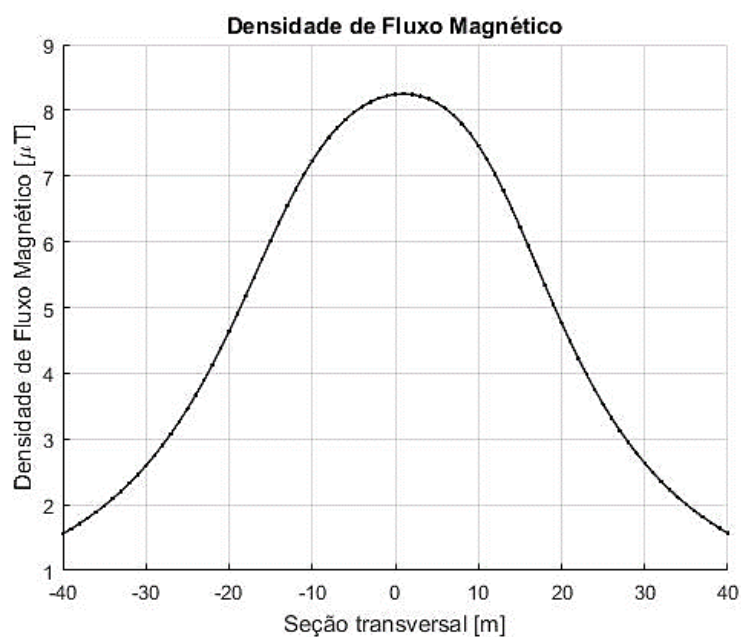


Figura 15 - Perfil de campo magnético obtido pela ferramenta computacional desta monografia.  
Fonte: Acervo da autora, com o uso do Matlab®.

Observa-se comportamento semelhante das curvas das Figuras 14 e 15. Uma pequena diferença pode ser observada nos valores máximos, sendo que na medição foi de  $8 \mu T$  na posição de  $-1 m$ , enquanto nos cálculos da ferramenta computacional o valor máximo foi de  $8,25 \mu T$  na posição de  $1 m$ . A Tabela 6 mostra algumas comparações entre os valores de medição e de cálculo.

Tabela 6 - Comparação entre os valores medidos por Guimarães (2005) e calculados nesta monografia

Posição (m)	Medição ( $\mu\text{T}$ )		Cálculo ( $\mu\text{T}$ )		Diferença %
0	7,8		8,24		17,7
40	1,50		1,55		3,33
-40	1,50		1,56		4,00
Val. Max./ Pos.	-1 m	8,00	1 m	8,25	3,12

Os valores calculados são muito próximos dos valores medidos, o que comprova a veracidade do formalismo matemático empregado para a ferramenta computacional.

## 4.2 Comparação com resultados computacionais divulgados na literatura

### 4.2.1 Comparação com simulações computacionais: Nafar e outros, 2013

Em novembro de 2013, foi publicado um estudo de Nafar e outros sobre o campo magnético em uma linha de transmissão de 63 kV. Os autores realizam várias simulações computacionais variando a altura do ponto de observação do campo magnético. O *software* utilizado pelos autores para as simulações foi o Matlab®. A Figura 16 ilustra a configuração geométrica e disposição dos cabos na linha de transmissão de 63 kV.

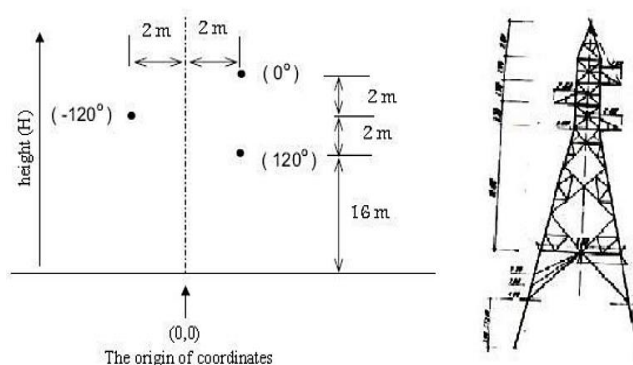


Figura 16 - Configuração geométrica - LT 63 kV.  
Fonte: NAFAR, 2013.



Como ilustrado na Figura 16, o eixo de simetria parte do centro da estrutura. As fases estão a uma distância de 2 m do eixo. A corrente máxima utilizada na simulação é de 2000 A. As Figuras 17 e 18 ilustram, respectivamente, os valores de simulação de Nafar e outros (2013) e os cálculos obtidos a partir da ferramenta computacional desta monografia.

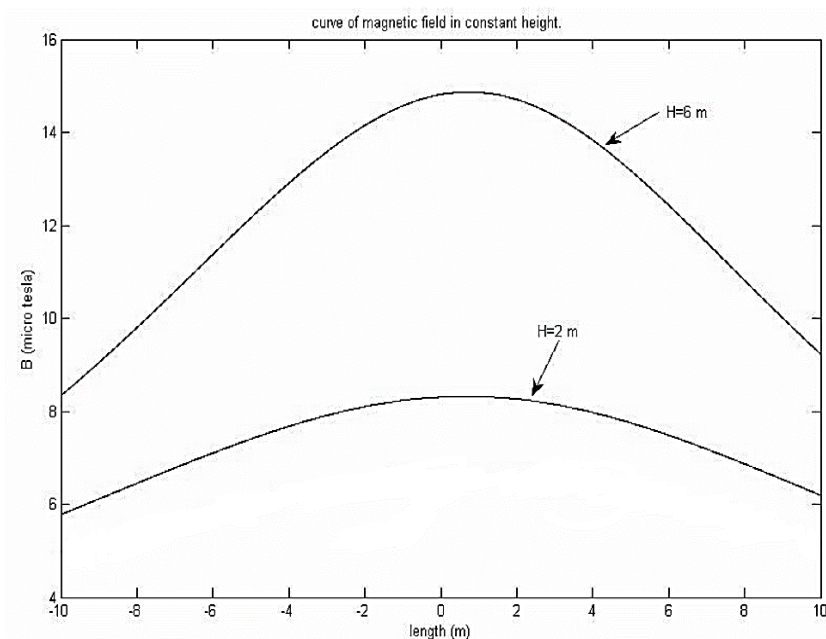


Figura 17 - Perfis de campo magnético simulados por Nafar, 2013.  
Fonte: Adaptado, NAFAR, 2013.

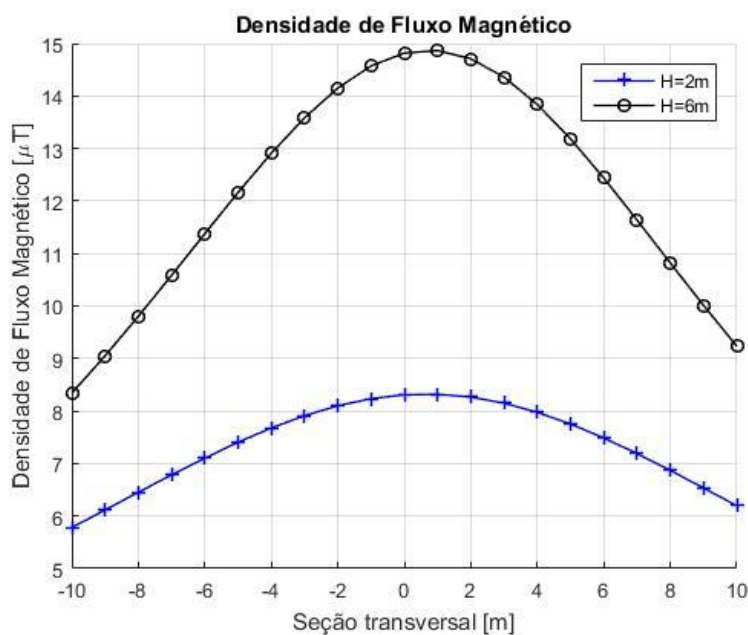


Figura 18 - Perfis de campo magnético obtidos pela ferramenta computacional desta monografia.

Fonte: Acervo da autora, com o uso do Matlab®.

É evidente a grande semelhança entre os valores calculados por Nafar e outros (2013) e os calculados nesta monografia. Vale ressaltar também que os comportamentos das curvas também são semelhantes para ambos os cálculos e alturas. A Tabela 7 mostra tal semelhança em função de alguns pontos importantes nos gráficos, garantindo a confiabilidade da ferramenta computacional desta monografia.

Tabela 7 - Comparação entre os valores computacionais de Nafar (2013) e calculados nesta monografia

Valor Max.	Nafar e outros ( $\mu\text{T}$ )	Cálculo ( $\mu\text{T}$ )	Diferença %
$H = 2\text{m}$	8,3	8,32	0,24
$H = 6\text{m}$	14,8	14,86	0,4

#### 4.2.2 Comparação com simulações computacionais: Vieira, 2013

Hugo Rodrigues Vieira realizou em 2013 um estudo sobre o acoplamento magnético entre linhas de transmissão e dutos metálicos aéreos. Ele utiliza três configurações reais de algumas linhas de transmissão da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). A Figura 19 e a Tabela 8 apresentam as silhuetas dos sistemas analisados e as características elétricas e geométricas de cada sistema, respectivamente.

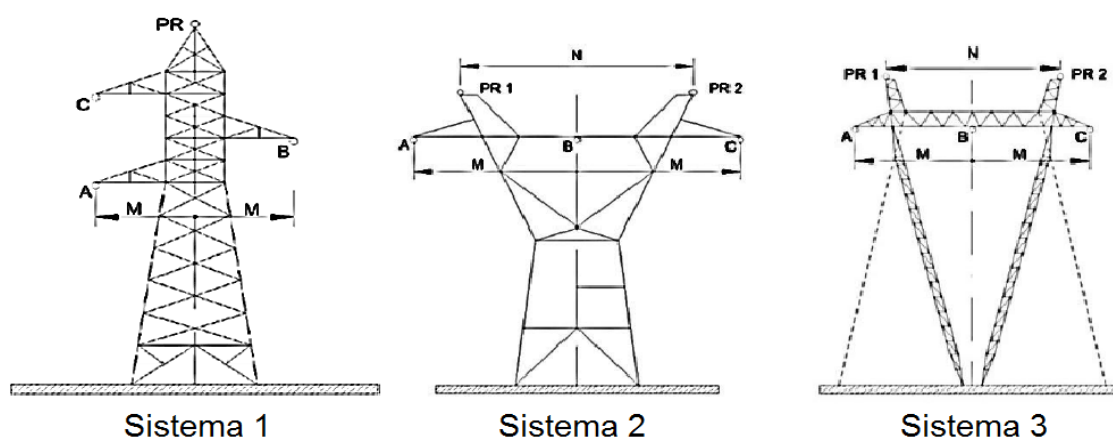


Figura 19 - Silhuetas dos sistemas analisados por Vieira (2013).  
Fonte: VIEIRA, 2013.

Tabela 8 - Configurações elétricas e geométricas dos sistemas de Vieira (2013)

Sistema	Tensão	Corrente	Altura Fase A	Altura Fase B	Altura Fase C	M
Sistema 1	138 kV	146,43 A	12,15 m	14,01 m	15,87 m	3 m
Sistema 2	345 kV	418,3 A	14,00 m	14,00 m	14,00 m	9,5 m
Sistema 3	500 kV	837,15 A	16,53 m	16,53 m	16,53 m	10,25 m

Fonte: VIEIRA, 2013.

A frequência de operação das linhas de transmissão é de 60 Hz. O perfil transversal é da ordem de 60 m, ou seja, variando 30 m para cada lado a partir do eixo de simetria, o centro das estruturas. O campo magnético foi calculado a uma altura de 1 m do solo. A resistividade do solo considerada pelo autor foi de 2400  $\Omega.m$ . As Figuras 20 e 21 ilustram, respectivamente, os valores de simulação de Vieira (2013) e os cálculos obtidos a partir da ferramenta computacional desta monografia. A Tabela 9 demonstra alguns valores importantes para a comparação dos resultados.

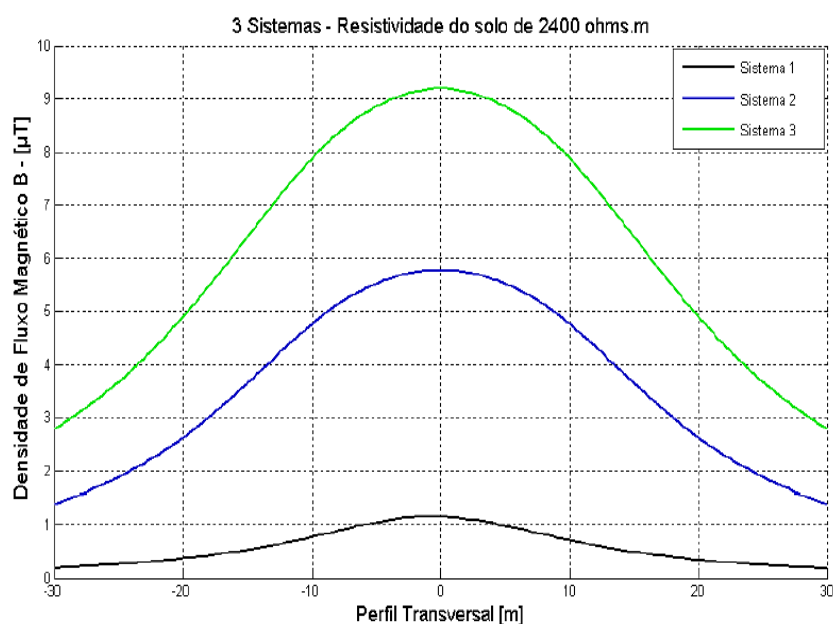


Figura 20 - Perfis de campo magnético simulados por Vieira (2013).

Fonte: VIEIRA, 2013.

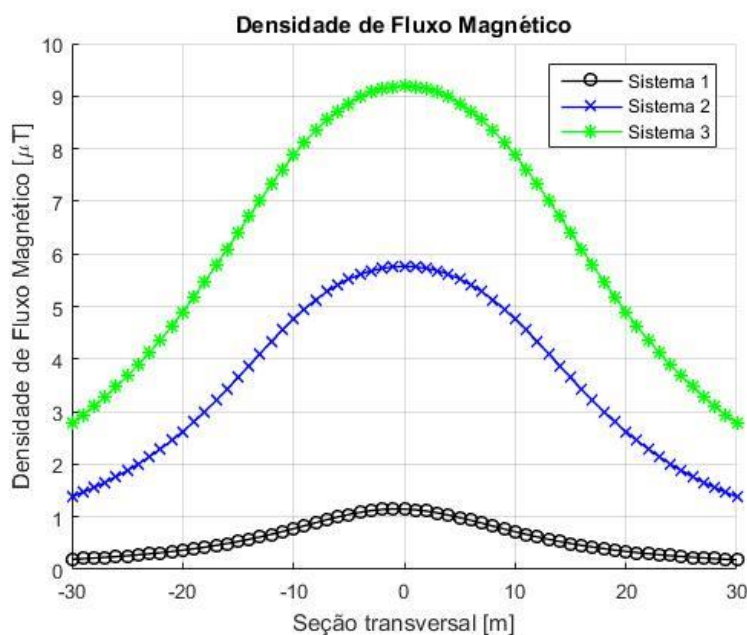


Figura 21 - Perfis de campo magnético obtidos pela ferramenta computacional desta monografia.

Fonte: Acervo da autora, com o uso do Matlab®.

Tabela 9 - Comparação entre os valores computacionais de Vieira (2013) e calculados nesta monografia

Sistema 1					
Posição (m)	Vieira (μT)		Cálculo (μT)		Diferença %
0	1,14		1,14		0
30	0,18		0,18		0
-30	0,19		0,19		0
Val. Max./ Pos.	-1 m	1,15	-1 m	1,15	0
Sistema 2					
Posição (m)	Vieira (μT)		Cálculo (μT)		Diferença %
0	5,76		5,76		0
30	1,38		1,38		0
-30	1,38		1,38		0
Val. Max./ Pos.	0 m	5,76	0 m	5,76	0
Sistema 3					
Posição (m)	Vieira (μT)		Cálculo (μT)		Diferença %
0	9,18		9,18		0
30	2,78		2,78		0
-30	2,78		2,78		0
Val. Max./ Pos.	0 m	9,18	0 m	9,18	0

Fica evidenciado a grande semelhança no comportamento das curvas dos gráficos das Figuras 20 e 21. Para comprovar tal semelhança, não houve diferença

entre nenhum valor apresentado na Tabela 9, o que implica na validação dos resultados obtidos com o uso da ferramenta computacional.

### **4.3 Considerações finais sobre as comparações**

Os resultados das comparações mencionadas nas seções 4.1 e 4.2 foram satisfatórios. As comparações foram feitas com vários modelos de estruturas diferentes, entre simulações e medições. Isto implica que a ferramenta computacional construída para cálculo de campo magnético é confiável.

Por esse motivo, a rotina computacional seria útil nos projetos iniciais de linhas de transmissão. Por exemplo, a faixa de passagem de uma linha de transmissão é determinada em função do tipo de utilização ou natureza do terreno e, principalmente, em função das interferências eletromagnéticas geradas pela linha (ABNT,1985). Deste modo, a rotina computacional identificaria os níveis de campo magnético emitidos pela linha de transmissão e delimitaria a faixa de passagem para fases iniciais de projetos.

De forma geral, as medições feitas em campo poderiam ser reduzidas devido a confiabilidade da simulação computacional e seria possível até mesmo projetar uma linha de transmissão a partir das simulações.

Assim, com a ferramenta computacional validada, a seção a seguir irá avaliar os dados de medições de duas linhas de transmissão e compará-las com as simulações das modelagens apresentadas para análise.

## **4.4 Linhas de transmissão sob estudo – Estreito e Mascarenhas de Morais**

### **4.4.1 Medição dos campos magnéticos – Estreito e Mascarenhas de Morais**

Os dados de medições de duas linhas de transmissão do Sistema Furnas foram disponibilizados para estudo e análise nesta monografia. As medições de campo

magnético foram realizadas nas linhas Estreito (LTFUES) e Mascarenhas de Moraes (LTFUMM), entre as torres 3 e 4, localizadas próximas da Oficina da Divisão de Ensaio e Apoio à Manutenção – DEAM.O da cidade de São José da Barra. As duas linhas de transmissão têm geometria horizontal, estão a uma distância de aproximadamente 32 metros entre si e operam a 345 kV. A Figura 22 mostra as linhas de transmissão, no local próximo das medições.



Figura 22 - Linhas de Transmissão sob estudo.  
Fonte: FURNAS, 2015.

No total, foram medidos 155 pontos de seção transversal. Cada ponto tem distância de um metro entre si. Os pontos P01 até o ponto P51 foram medidos no dia 13 de agosto de 2015. Os pontos P52 até o ponto P101 foram medidos no dia 14 de agosto de 2015. Já os pontos P102 até o ponto P155 foram medidos no dia 17 de agosto de 2015. A Figura 23 ilustra a disposição das linhas de transmissão e a marcação dos pontos medidos.

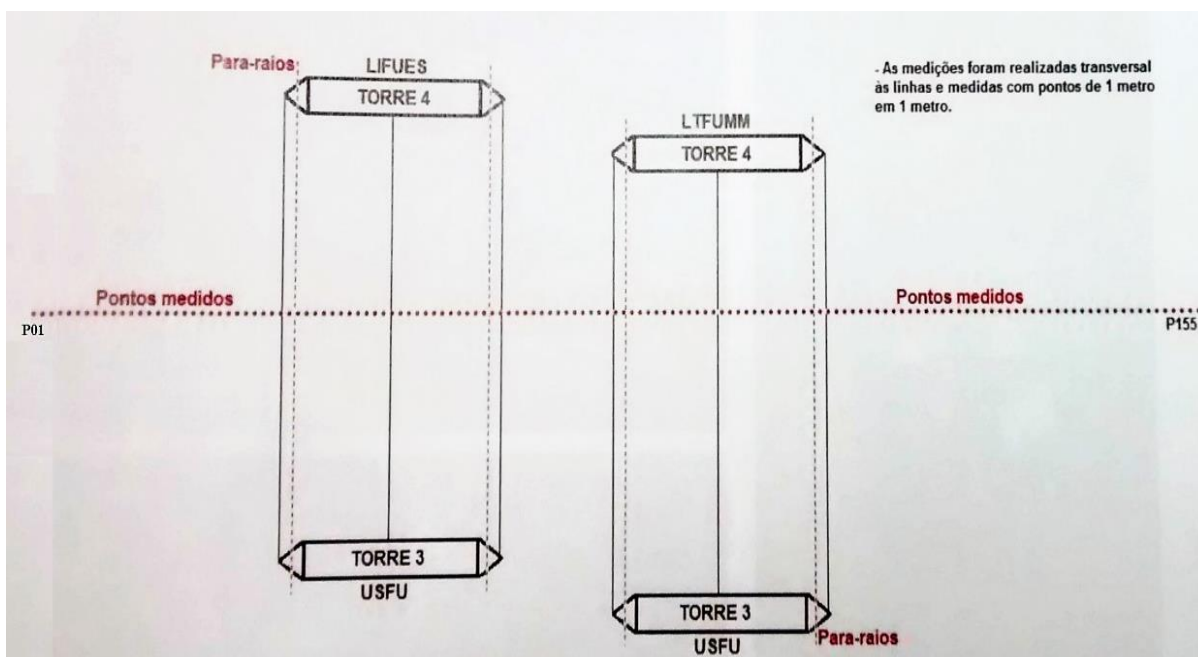


Figura 23 - Marcação dos pontos medidos.  
Fonte: FURNAS, 2015.

Conforme as medições de campo magnético que ocorreram em 3 dias, as correntes das linhas de transmissão também foram medidas. As Tabelas 10 e 11 mostram os valores de corrente nos horários e datas de medição ocorridos nos três dias, para as linhas LTFUES e LTFUMM, respectivamente. Assim, as correntes utilizadas nas simulações serão as correntes médias nos períodos de medição.

Tabela 10 - Correntes da LTFUES nos dias e horários de medição

<b>LTFUES</b>	
<b>Horário</b>	<b>Corrente (A)</b>
<b>13/08/2015</b>	
09:00 - 09:30	272,4
09:30 - 10:00	292,3
10:00 - 10:30	301,1
10:30 - 11:00	353,9
<b>14/08/2015</b>	
10:00 - 10:30	321,6
10:30 - 11:00	343,9
11:00 - 11:30	368,5
<b>17/08/2015</b>	
09:00 - 09:30	257,8
09:30 - 10:00	277,1
10:00 - 10:30	296,4

Fonte: FURNAS, 2015.

Tabela 11 - Correntes da LTFUMM nos dias e horários de medição

LTFUMM	
Horário	Corrente (A)
<b>13/08/2015</b>	
09:00 - 09:30	260,1
09:30 - 10:00	280
10:00 - 10:30	287,6
10:30 - 11:00	335,1
<b>14/08/2015</b>	
10:00 - 10:30	300,5
10:30 - 11:00	323,4
11:00 - 11:30	346,2
<b>17/08/2015</b>	
09:00 - 09:30	246
09:30 - 10:00	264,8
10:00 - 10:30	282,4
10:30 - 11:00	305,8

Fonte: FURNAS, 2015.

A Figura 24 apresenta uma representação alternativa à Figura 23, com alguns detalhes das distâncias considerados nas medições e cálculos. A altura do instrumento de medição, mencionado na seção 2.3, foi de um metro do solo. Também foram determinadas as alturas cabo-solo para cada fase, representadas pela letra  $h$ , que devido à geometria da linha aparentemente têm a mesma altura. Porém, o terreno é irregular e faz com que haja diferença entre as alturas. A distância entre as torres é de aproximadamente 32 m, representada pela letra  $D$ , e  $M$  é a distância entre as fases.

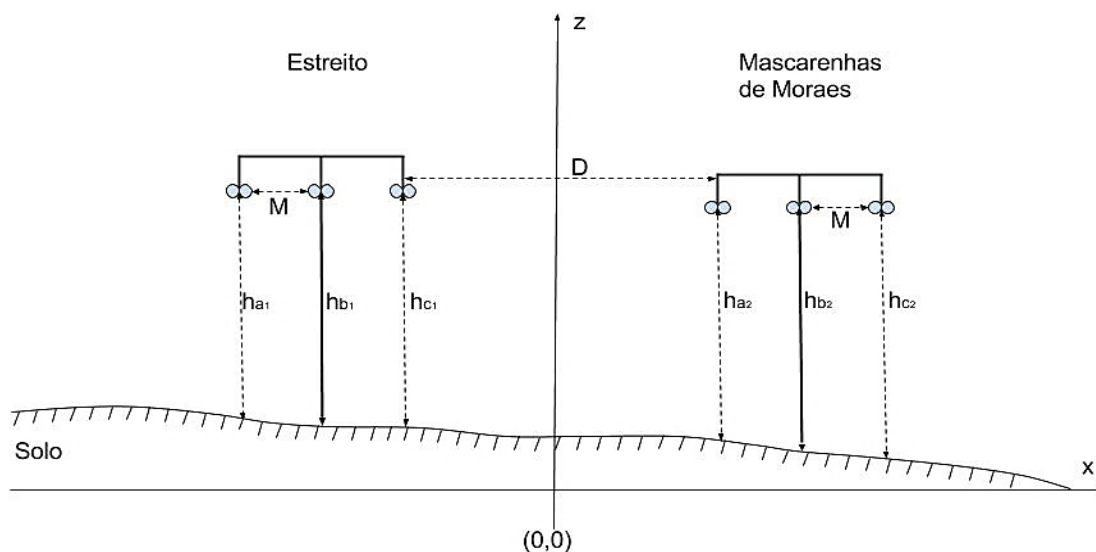


Figura 24 - Detalhes das distâncias consideradas.  
Fonte: Acervo da Autora.



As Tabelas 12 e 13 mostram as características geométricas e elétricas das linhas de transmissão sob estudo, LTFUES e LTFUMM, respectivamente.

Tabela 12 - Características geométricas e elétricas LTFUES

<b>LTFUES – Estreito</b>	
Tensão de operação	345 kV
Corrente Média	309,5 A
Nº condutores/fase	2
Nº cabos para-raios	2
Distância sub condutores	0,457m
Altura Fase A ( $h_{a1}$ )	10,08m
Altura Fase B ( $h_{b1}$ )	10,35m
Altura Fase C ( $h_{c1}$ )	11,00m
Altura para raio 1	15,72m
Altura para raio 2	16,90m
Diâmetro cabos Fases	29,6mm
Diâmetro para-raios	3/8 pol
Distância entre as fases (M)	8,40m
Distância entre os para-raios	6,20m

Fonte: FURNAS, 2015.

Tabela 13 - Características geométricas e elétricas LTFUMM

<b>LTFUMM – Mascarenhas de Moraes</b>	
Tensão de operação	345 kV
Corrente Média	293,8 A
Nº condutores/fase	2
Nº cabos para-raios	2
Distância sub condutores	0,457m
Altura Fase A ( $h_{a2}$ )	15,32m
Altura Fase B ( $h_{b2}$ )	15,45m
Altura Fase C ( $h_{c2}$ )	17,01m
Altura para raio 1	21,77m
Altura para raio 2	25,98m
Diâmetro cabos Fases	29,59mm
Diâmetro para-raios	3/8 pol
Distância entre as fases (M)	8,40m
Distância entre os para-raios	6,20m

Fonte: FURNAS, 2015.

Por fim, a Figura 25 apresenta os valores de campo magnético medidos no período de três dias, em uma seção transversal de 155 metros, entre as linhas de transmissão Estreito e Mascarenhas de Moraes do Sistema Furnas-MG, considerando como eixo de simetria o centro da distância entre as linhas de transmissão, como ilustrado na Figura 24.

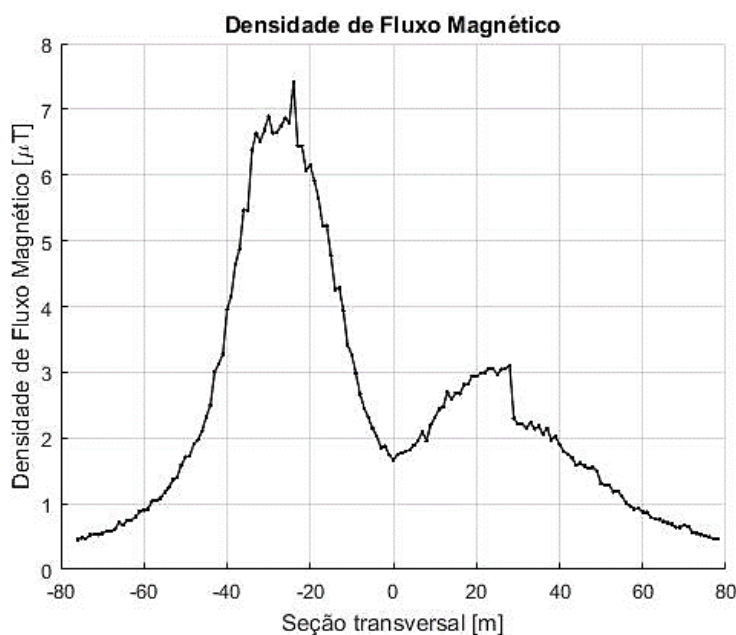


Figura 25 - Medições de campo magnético nas linhas LTFUES e LTFUMM.

Fonte: FURNAS, 2015.

#### 4.4.2 Comparação dos valores medidos com os métodos de cálculo de campo magnético

Com a validação da ferramenta computacional, é possível comparar os valores de campo magnético medidos nas linhas de transmissão sob estudo com os valores computacionais, analisando cada um dos métodos descritos no capítulo 3.

Realiza-se, então, a simulação no programa computacional elaborado nesta monografia. Assim, a Figura 26 mostra o perfil de campo magnético medido e os perfis de campo simulados para cada tipo de método, considerando os dados disponíveis nas Tabelas 12 e 13. A seção transversal analisada tem distância igual à seção das medições para melhor comparação e a altura de análise do campo também é igual à

utilizada na medição, ou seja, 1 m. Para o método das imagens complexas, a resistividade do solo utilizada foi de 2400  $\Omega \cdot m$ , valor típico dos solos de Minas Gerais.

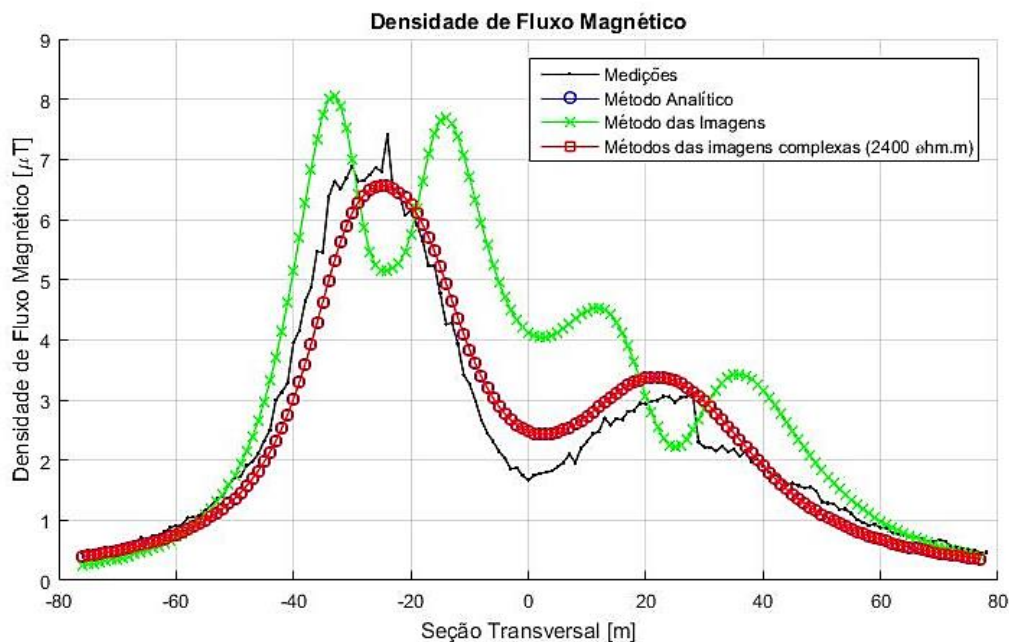


Figura 26 – Perfis de campo magnético da medição e dos métodos de cálculos.

Baseado na Figura 26, algumas observações podem ser realizadas:

- Os níveis máximos de campo magnético observados para as quatro curvas analisadas, não ultrapassam os valores estabelecidos pelas normas nacionais ou internacionais, apresentados nas Tabelas 2 e 3.
- O comportamento das curvas de medição, método analítico e das imagens complexas são semelhantes, sendo que a curva do campo magnético do método das imagens complexas sobrepõe a curva do método analítico. Porém o comportamento da curva do método das imagens é diferente, modificando os pontos nos quais o campo magnético atinge seus valores máximos.
- É evidente a interferência entre os campos magnéticos gerados pelas linhas de transmissão. O campo magnético decresce rapidamente para valores relativamente baixos nas extremidades, porém entre as linhas de transmissão, este fato não acontece, devido à interferência entre elas, havendo a superposição dos campos.

- Apesar do comportamento semelhante das curvas de medição, método analítico e das imagens complexas, os valores absolutos tiveram uma pequena diferença. Por exemplo, há vários fatores externos que podem influenciar nos valores de medição. A corrente na linha de transmissão depende da demanda de energia da rede. Por isso, ela varia muito ao longo do dia, como mostrado nas Tabelas 10 e 11. Assim, no momento da medição, o valor de corrente pode diferenciar dos valores utilizados nas simulações, e conseqüentemente, alterar os valores finais de campo magnético. Alguns fatores climáticos também podem influenciar no valor final do campo magnético, como umidade do ar e temperatura.

A Tabela 14 apresenta informações relevantes a respeito dos principais pontos da Figura 26, sendo eles as extremidades, valores de maior campo e eixo de simetria.

Tabela 14 - Informações numéricas da Figura 26 referente aos campos magnéticos simulados e medidos.

<b>Posição (m)</b>	<b>Medições (<math>\mu\text{T}</math>)</b>	<b>M. Analítico (<math>\mu\text{T}</math>)</b>	<b>M. Imagens (<math>\mu\text{T}</math>)</b>	<b>M. Imagens Comp. (<math>\mu\text{T}</math>)</b>
0	1,668	2,477	4,116	2,477
-76	0,452	0,396	0,251	0,396
77	0,461	0,359	0,404	0,359
-25	6,79	6,56	5,15	6,56
22	2,99	3,38	2,54	3,38

A Tabela 15 apresenta o percentual de diferença entre as medições (Med.) e os valores dos métodos mostrados na Figura 26, utilizando como referência os valores medidos. Pode-se observar, que os valores variaram demasiado no método das imagens, uma vez que o comportamento da curva foi diferente. Porém, nos métodos analítico e das imagens complexas houve baixa variação, principalmente nos pontos de maior campo, comprovando a validade do uso do programa para calcular campos magnéticos.

Tabela 15 - Diferença (%) entre valores medidos e os métodos de cálculo.

Posição (m)	Med. e Analit. (%)	Med. e Imagens (%)	Med. e Imag. Comp. (%)
0	48,5	146,76	48,5
-76	-12,38	-44,46	-12,38
77	-22,12	-12,36	-22,12
-25	-3,38	-24,15	-3,38
22	13,04	-15,05	13,04

Durante todas as análises, os resultados dos métodos analítico e das imagens complexas foram iguais, sendo que as curvas se sobrepõem na Figura 26. Porém, o método das imagens complexas considera o efeito do solo (resistividade  $\neq 0$ ) e o método analítico não. Desta forma, a seção a seguir irá avaliar o quanto o solo influencia no cálculo do campo magnético.

#### 4.4.3 Análise da sensibilidade do campo em relação à resistividade do solo

O método das imagens complexas utiliza em seus cálculos o efeito do solo, considerando a resistividade  $\neq 0$ , o que traduz no modo correto de inserção do solo nos cálculos, uma vez que o meio possui características próprias.

Como mencionado na seção 3.4, a modelagem do solo adotada corresponde à consideração do plano complexo “ $p$ ” de Deri (1981). Porém, segundo Gertrudes (2005, 2010) e Vieira (2013), a formulação do plano complexo de Deri (1981) pode ser reduzida e aproximada de acordo com a Equação 7, já apresentada, para análises em baixas frequências, 50 – 60 Hz.

Desta forma, com as considerações atribuídas para o método das imagens complexas, aplica-se a mesma análise do campo magnético para as linhas de transmissão sob estudo, para verificar a influência do solo no comportamento do campo magnético. Portanto, a Figura 27 apresenta o perfil de campo magnético das linhas LTFUES e LTFUMM em função de vários valores de resistividade, a um metro do solo.

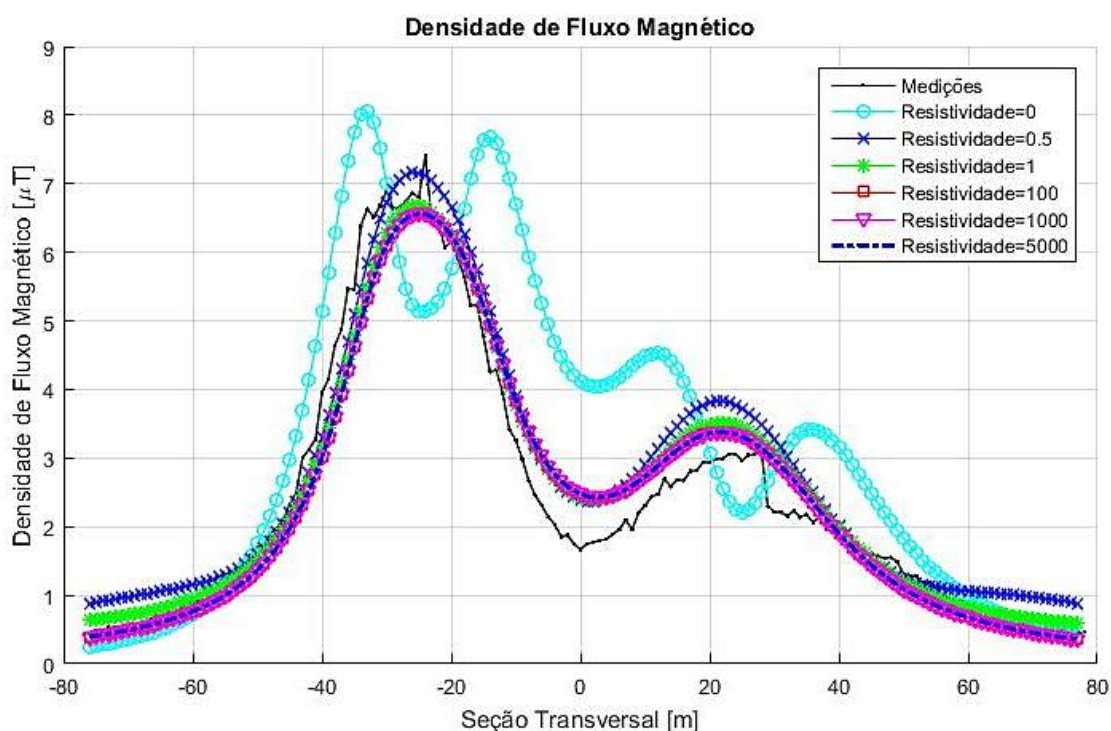


Figura 27 - Perfis de campo magnético variando a resistividade.

A curva de medição e as curvas para valores de resistividade acima de  $0,5 \Omega.m$  apresentam os mesmos comportamentos. Para valores de resistividades superiores a  $1 \Omega.m$  as curvas do campo magnético se sobrepõem e têm o mesmo valor máximo. Porém, considerando o solo ideal (resistividade = 0), o comportamento da curva modifica e os pontos de campo máximo são diferentes. Portanto, o método das imagens complexas tende a reduzir os valores máximos de campo magnético quando comparados ao método das imagens. Este fato acontece devido ao posicionamento das correntes de imagens, que no método das imagens complexas, ficam posicionadas a distâncias superiores em relação às correntes de imagem para efeito do solo com condutividade infinita.

Segundo Modena e Sueta (2011), em valores típicos de resistividade de solo, não existem valores inferiores a  $1 \Omega.m$ . Por este motivo, independentemente do local de instalação da linha de transmissão, o solo terá pequena ou nenhuma influência nos cálculos de campo magnético para baixas frequências, podendo ser calculado pelo método analítico. A Tabela 14 confirma esta afirmação, uma vez que não houve alteração entre os valores no método das imagens complexas e método analítico.

#### 4.5 Publicações resultantes desta monografia

As publicações a seguir são resultados desta pesquisa:

- P. C. Resende, G. L. Campos, M. G. Santos, “Cálculo dos níveis de campos magnéticos produzidos por linhas de transmissão operando em regime permanente, ” V Seminário de Iniciação Científica – SIC, Bambuí, Julho 2016.
- P. C. Resende, G. L. Campos, M. G. Santos, “Calculation methodology and computational analysis of the magnetic field of transmission lines operating at steady state, ” XIV Conferência de Estudo em Engenharia Elétrica – CEEL, Uberlândia, Outubro 2016.
- P. C. Resende, G. L. Campos, M. G. Santos, “Estudo sobre as principais regulamentações dos campos eletromagnéticos na operação em regime permanente de linhas de transmissão”. Artigo submetido na Revista ForScience e aguardando avaliação.

## 5 CONCLUSÃO

Cada vez mais, os seres humanos estão dividindo espaço com as linhas de transmissão devido ao crescimento do sistema elétrico de potência e da população. Muitas vezes, as instalações comerciais e residências estão nas faixas de passagens das linhas de transmissão. Por isso, os órgãos públicos e ambientais têm certa preocupação em avaliar a exposição do público aos níveis de campos magnéticos. Desta maneira, se faz necessária a determinação do campo magnético emitidos por linhas de transmissão de forma confiável.

Esta monografia teve como objetivo construir uma ferramenta computacional desenvolvida no Matlab® para calcular e analisar o campo magnético gerado por duas linhas de transmissão do sistema Furnas-MG. Porém, para chegar ao objetivo final, alguns passos prévios foram seguidos para obter os resultados esperados.

É importante estabelecer as modelagens utilizadas para cálculo do campo magnético. Portanto, escolheu-se as modelagens comumente empregadas nas literaturas contempladas sobre campos magnéticos. O efeito do solo foi incluído nas modelagens, uma vez que o solo tem características físicas próprias, o que aumenta a confiabilidade dos resultados.

Para validar os resultados dos cálculos computacionais, foi feita a comparação com os perfis de campo magnético disseminados na literatura da área, divididos entre medições e simulações computacionais. Houve uma grande similaridade nos resultados e perfis de campo, o que confirma a validação da ferramenta, apesar de algumas inconsistências nas informações de cálculos de alguns autores. Devido a confiabilidade, a ferramenta computacional poderia ser utilizada em fases iniciais de projetos de linhas de transmissão, apresentando valores prévios dos níveis de campo magnético para delimitar faixa de passagem.

Deste modo, as medições das linhas de transmissão sob estudo foram comparadas com os cálculos das modelagens demonstradas nesta monografia. Tal comparação possibilita várias conclusões. É evidente a interferência que uma linha causa na outra. Os campos magnéticos diminuem drasticamente à medida que se afastam das linhas de transmissão, porém entre as duas linhas o campo continua com um valor considerável, pois houve superposição dos campos magnéticos.



O perfil do campo magnético é sensível em relação a modelagem. Por exemplo, o comportamento da curva modifica quando o solo é considerado um condutor elétrico perfeito (resistividade = 0). Porém, para o cálculo que não considera o efeito do solo e o cálculo que considera as características do solo, os comportamentos das curvas foram similares. Por este motivo, analisou-se a sensibilidade do campo magnético em relação à resistividade do solo. A partir destas análises, pode-se concluir que para resistividade acima de 1  $\Omega$ .m todas as curvas ficam sobrepostas e por isso, valores reais de resistividade não alteram o comportamento do campo magnético.

Apesar do mesmo comportamento da curva de medição e de algumas modelagens, os valores absolutos obtiveram uma pequena diferença. Tal fato pode ocorrer devido a variação das correntes no horário da medição e a corrente média utilizada para as simulações. O solo com perfil irregular aumenta as chances de erros nas medições de altura e distâncias dos cabos. Fatores externos também podem alterar os resultados, como umidade relativa do ar ou temperatura no momento da medição.

Contudo, os valores de campo magnético em nenhum dos perfis analisados nesta monografia excedem os limites estabelecidos pelas normas nacionais ou internacionais.

Por fim, o programa computacional em Matlab® apresentado nesta monografia se mostrou confiável e versátil, uma vez que se analisa qualquer geometria, com características diferentes de uma linha de transmissão, com mínimo de erros nos resultados finais.

## 5.1 Trabalhos Futuros

O tema estudado em toda monografia é vasto e apresenta várias propostas de continuidade para trabalhos futuros, dentre as quais podem ser citadas:

- Estudo de medidas mitigatórias para redução do campo magnético produzidos em linhas de transmissão;
- Ampliar a ferramenta computacional para linhas de transmissão com dois ou mais circuitos;

- Estudo dos campos magnéticos em linhas de transmissão operando em regime transitório;
- Desenvolvimento de uma interface gráfica para a ferramenta computacional empregada, afim de facilitar a interação homem-máquina.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 15145**: Métodos de medições de níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 a 60 Hz. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 5422**: Projetos de linhas de transmissão de energia elétrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985.

ABRADEE. **Visão Geral do Setor**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>>. Acesso em: 15 de ago. 2016.

ANEEL. **Banco de Informações: Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 15 de ago. 2016a.

\_\_\_\_\_. **Banco de Informações: Matriz de Energia Elétrica, 2014**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 15 de ago. 2016.

\_\_\_\_\_. **Banco de Informações: Matriz de Energia Elétrica, 2016**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 15 de ago. 2016b.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa nº 394**, de 23 de março de 2010. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 22 de ago. 2016.

CAMPOS, O. L. Estudo de caso sobre impactos ambientais de linhas de transmissão na Região Amazônica. **BNDES Setorial**, n. 32, p. 231-266, set. 2010.

COSTA, L. A.; MONTEIRO, V. B. **Minimização do campo magnético em linhas de transmissão**. Dezembro, 2005. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~jramirez/disciplinas/otimizacao/t3.pdf>>. Acesso em: 18 de ago. 2016.

CPFL, **Orientação técnica**. Linhas de Transmissão - Ocupação de Faixa de Passagem, 2007.

DERI, A.; TEVAN, G.; SEMLYEN, A.; CASTANHEIRA, A. The Complex Ground Return Plane A Simplified Model For Homogeneous And Multi-Layer Earth Return. **Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, Volume: PAS-100, pp. 3686-3693, 1981.

FURNAS, Eletrobrás. **Oficina da Divisão de Ensaio e Apoio à Manutenção**. São José da Barra - MG, 2015.

GERTRUDES, J. B. **Comportamento eletromagnético do solo no domínio da frequência: Tratamento de dados de campo e influência no desempenho de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.** Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, 2005.

\_\_\_\_\_, J. B. **Influência da condutividade e permissividade do solo em função da frequência no cálculo da impedância longitudinal e admitância transversal de linhas aéreas de transmissão.** Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, 2010.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. **Power System Analysis & Design**, SI Version. USA: Cengage Learning, 2012.

GUIMARÃES, G. E. **Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV.** 86 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Belo Horizonte, 2005.

ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). **Health Phys**, v. 74, n.4, p.494-522, 1998.

IEEE. **IEEE-C95.6:** Standard of Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 to 3Khz. IEEE Standards Coordinating Committee 28, October, 2002.

LAFOREST, J. J. **Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above.** USA: United States General Electric Company, 1981.

MODEMA, J.; SUETA, H. Medição da resistividade do solo. **O Setor Elétrico**, ed. 70, p. 30-35, ano 6, nov. 2011.

NAFAR, M.; SOLOOKINEJAD, G.; JABBARI, M. Magnetic field calculation of 63 kV transmission lines. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**, v. 17, n. 2, p. 218, 2013.

NARDA. **Manual de instruções: Analisador de campo EFA 300.** Narda Safety Test Solutions, 2016. Disponível em: <[http://www.narda-sts.us/pdf\\_files/DataSheets/EFA300\\_DataSheet.pdf](http://www.narda-sts.us/pdf_files/DataSheets/EFA300_DataSheet.pdf)>. Acesso em: 30 de ago. 2016.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Dados Relevantes, 2014.** Disponível em:

<[http://www.ons.org.br/download/biblioteca\\_virtual/publicacoes/DADOS2014\\_ONS/7\\_2.html](http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/DADOS2014_ONS/7_2.html)>. Acesso em: 18 de ago. 2016a.

\_\_\_\_\_. **Integração Eletroenergética**, 2014. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/pop/pop\\_integracao-eletoenergetica.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/pop/pop_integracao-eletoenergetica.aspx)>. Acesso em: 15 de ago. 2016b.

RAMÍREZ, J. A. Campos eletromagnéticos devido a sistemas de energia elétrica. **Anais: Efeitos Biológicos Devidos à Ação de Campos Eletromagnéticos**. USP - São Paulo, Brasil, 2001.

SADIKU, M. O. **Elementos do Eletromagnetismo**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SANTIAGO, D. M. C.; CUNHA, R. C. d. Ferramenta computacional para cálculos de impedâncias características, funções de propagação e impedâncias de sequências de linhas de transmissão aéreas trifásicas, considerando os efeitos dos cabos para-raios do solo. **SME - Sociedade Mineira de Engenheiros**, Belo Horizonte, 2009.

SANTOS, M. G. **Acoplamento elétrico entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos**. 129 f. Dissertação de Mestrado - PPGEL - Universidade Federal de São João del-Rei, 2011.

SILVA, H. M. O. **Linhas de transmissão de energia elétrica: estudo sobre compatibilidade eletromagnética**. 105 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, 2012.

VIEIRA, H. R. **Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos**. 180 f. Dissertação de Mestrado - PPGEL – Universidade Federal de São João del-Rei, 2013.

ZAHN, M. **Electromagnetic field theory: A problem solving approach**. Florida: Krieger Publishing Company, 2003.

## ANEXO I

Fluxograma simplificado da ferramenta computacional:

