

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
FILIPE CÉSAR ARCHÂNGELO E SILVA**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CAMPO MAGNÉTICO NAS  
PROXIMIDADES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME  
PERMANENTE: comparativo com as normas vigentes**

**Varginha**

**2016**

**FILIPPE CÉSAR ARCHÂNGELO E SILVA**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CAMPO MAGNÉTICO NAS  
PROXIMIDADES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS OPERANDO EM  
REGIME PERMANENTE: Comparativo com as normas vigentes**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira.

**Varginha**

**2016**

**FILIFE CÉSAR ARCHÂNGELO E SILVA**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CAMPO MAGNÉTICO NAS  
PROXIMIDADES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS OPERANDO EM  
REGIME PERMANENTE: Comparativo com as normas vigentes**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em 06/12/2016

---

Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira

---

Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni

---

Eng. Luiz Antonio da Silva Silvério

OBS:

Dedico esse trabalho a toda minha família e namorada, que no decorrer do curso sempre me apoiaram. Sem eles nada disso seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus pela saúde e dedicação que precisei durante o curso e também ao meu orientador pela ajuda na construção deste trabalho.

“Demore o tempo que for para decidir o que  
queres da vida. E quando decidir não recue  
ante nenhum pretexto, pois o mundo tentará te  
dissuadir”.

Friedrich Nietzsche

## RESUMO

No Brasil, a geração hidráulica é a maior responsável pela energia. É notável a grande distância entre usinas hidrelétricas e centros consumidores; sendo assim, faz-se uso de linhas de transmissão extensas. Tendo em vista tal situação, é plausível salientar a presença de campos magnéticos nas linhas de transmissão, e por sua vez, interferências magnéticas que estes campos podem causar. Mediante a este fato, o trabalho tem o objetivo principal de fazer uma modelagem computacional de campo magnético nas proximidades de linhas de transmissão operando em regime permanente, e assim fazer um comparativo com as normas vigentes. A modelagem computacional tem como fator principal calcular níveis de campo magnético na faixa de passagem de uma linha de transmissão. O cálculo em si torna-se importante, uma vez que, o nível de campo magnético gerados na faixa de passagem pode colocar em risco a segurança de pessoas e/ou animais próximos das instalações. A obtenção dos resultados é feita por meio de um programa computacional, desenvolvido no *Matlab*®, que permite realizar uma série de simulações. Para as análises, leva-se em consideração configurações geométricas das linhas de transmissão, variações dos parâmetros solo e um estudo feito em baixa frequência (60 Hz). Para validar os resultados, ainda é feito um comparativo com outros resultados, experimentais e computacionais, existentes na literatura.

**Palavras-Chave:** Modelagem computacional. Campo magnético. Linha de transmissão. Interferência magnética.

## **ABSTRACT**

*In Brazil, hydroelectric generation is the most responsible for energy. It is remarkable the great distance between power plants and consumption centers; thus, it makes use of extensive transmission lines. In view of this situation, it is reasonable to emphasize the presence of magnetic fields in the transmission lines, and in turn, these magnetic interference fields can cause. By this fact, the work has the main objective to make a computational modeling of magnetic field in the vicinity of transmission lines operating at steady state, and so do a comparison with the current rules. Computer modeling has as main factor to calculate the magnetic field levels in the passband of a transmission line. The calculation itself becomes important, since the level of the magnetic field generated in the passband can put at risk the safety of people and / or animals near the premises. The obtained results is made by a computational program developed in Matlab®, to perform a series of simulations. For the analysis takes into account geometric configurations of transmission lines, changes in soil parameters and a study on low frequency (60 Hz). To validate the results, it is still done a comparison with other results, computational and experimental, in the literature.*

**Keywords:** *Computational modeling. Magnetic field. Transmission line. Magnetic interference.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Silhueta da torre do Sistema 1 ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 2 - Silhueta da torre do Sistema 2 ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 3 - Silhueta da torre do Sistema 3 ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 4 - Altura média dos condutores. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 5 - Cabo com condutor múltiplo. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6 - Fases ABC em um sistema trifásico, simétrico e equilibrado. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7 - Sistema físico real monofásico generalizado para cálculo do campo magnético composto por 2 meios semi-infinitos: ar para  $z > 0$  e solo para  $z < 0$ . A linha de transmissão se estende ao longo do eixo  $y$ . **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 8 - Método das Imagens para um sistema monofásico. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 9 - Método das Imagens para um sistema trifásico. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 10 - Método das Imagens Complexas de A. Deri et al... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 11 - Análise de sensibilidade do campo magnético para os Sistemas 1, 2 e 3 com resistividade do solo de  $2400 \Omega.m$  ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 12 - Análise de sensibilidade do campo magnético para as LT's 1, 2 e 3 com resistividade de solo de  $2400 \Omega.m$  ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 13 - Geometria da Linha de Transmissão. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 14 - Silhueta da linha de transmissão. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 15 - Perfil de campo magnético obtidos por medições. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 16 - Perfil do campo magnético obtido através do programa desenvolvido neste trabalho para a linha de transmissão da Figura 14 .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 17 - Densidade de fluxo magnético da LT 1. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 18 - Densidade de fluxo magnético da LT 2. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 19 - Densidade de fluxo magnético da LT 3. .... **Erro! Indicador não definido.**

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>2 DESCRIÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO SOB ESTUDO ....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>2.1 Visão geral sobre linhas de transmissão .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>2.1.1 Características gerais de uma linha de transmissão .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>2.2 Apresentação das linhas sob estudo .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>3 MODELAGEM MAGNÉTICA PARA CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO..</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>3.1 Introdução .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>3.2 Premissas e limites de validade .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>3.3 Lei de Ampère .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>3.4 Método das Imagens .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>3.5 Inclusão do efeito do solo via método de A. Deri .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>3.6 Equação final de <math>\vec{H}</math> e <math>\vec{B}</math> pelo Método Aproximado .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>4 NORMAS A EXPOSIÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>4.1 Normas existentes .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>4.1.1 Limites pertinentes e comparativos entre as normas .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>4.2 Efeitos da exposição a campos magnéticos .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>5 RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>5.1 Validação dos resultados .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>5.2 Comparação com os resultados computacionais divulgados na literatura .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>5.3 Avaliação com os limites estabelecidos pelas normas .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>6 CONCLUSÃO E PROPOSTA DE CONTINUIDADE .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O território brasileiro, em consequência de sua larga extensão, é trilhado por um amplo sistema de linhas de transmissão. O mesmo é encarregado de um fornecimento de energia elétrica a 99,3% dos domicílios do país, segundo dados do N3E/MME (Ministério de Minas e Energia).

O sistema elétrico de potência do Brasil tem sua geração hidráulica como a maior responsável pela energia, sendo assim, é cabível enfatizar a grande distância entre as usinas hidrelétricas e seus centros consumidores; tornando justificável a existência de extensas linhas de transmissão.

A configuração do sistema de energia elétrica é formada, principalmente, pela geração, transformação, distribuição e transmissão. Sabe-se que a transmissão ocupa uma maior extensão do que as outras, sendo assim, verifica-se a necessidade de um estudo minucioso referente a fins econômicos e físicos. Para tais fins existe a imprescindibilidade de elevação da tensão nas linhas de transmissão, que por consequência, eleva os níveis de interferência magnética em suas proximidades.

Uma vez que, entende-se a necessidade de elevação das tensões nas linhas de transmissão, é plausível salientar que tal elevação nos níveis pode colocar em situações nocivas estruturas e animais que se encontram dentro da faixa de passagem das linhas de transmissão; verifica-se, pois, a indispensabilidade de uma delimitação, em todas as direções de uma linha de transmissão, devido à exposição a campos magnéticos.

O elucidado acima explana a relevância do tema sob investigação e justifica a pesquisa sobre tal temática.

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma modelagem computacional do campo magnético nas proximidades de linhas de transmissão aéreas operando em regime permanente, e com isso, comparar se estão de acordo com as normas vigentes.

Para que a proposta seja efetuada de forma sólida, objetivos específicos devem ser respectivamente, alcançados. São eles: analisar os métodos para cálculo do campo magnético, e através de uma conferência dos mesmos, avaliar qual desses é de maior relevância para ser utilizado neste trabalho; inclusão do efeito solo modelado pelo plano complexo de retorno através do método proposto por A. Deri (1981); validação dos resultados via estudos já realizados na área.

O texto deste trabalho está organizado em seis capítulos, incluindo este primeiro capítulo introdutório.

No Capítulo 2, *Descrição da linha de transmissão sob estudo*, é feita uma investigação sobre a linha de transmissão em estudo, trazendo consigo uma visão geral sobre linhas de transmissão, juntamente com suas características.

No Capítulo 3, *Modelagem magnética para cálculo do campo magnético*, são apresentados os métodos para modelagem magnética. Cômescio disto, é apresentada ainda, a modelagem mais cabível para as análises em questão.

No Capítulo 4, *Normas a exposição de campos magnéticos*, aborda os limites pertinentes e comparativos entre as normas, bem como, os efeitos de campos magnéticos em seres humanos.

No Capítulo 5, *Resultados e Análises*, são apresentados os resultados das modelagens computacionais de campo magnético realizadas em diferentes configurações de linhas de transmissão, operando em regime permanente, mencionadas no Capítulo 2.

Por fim, no Capítulo 6, são descritas as conclusões finais deste trabalho, assim como propostas de continuidade do tema em investigação.

## 2 DESCRIÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO SOB ESTUDO

### 2.1 Visão geral sobre linhas de transmissão

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem como objetivo, gerar, transmitir e fazer a distribuição de energia elétrica seguindo normas de confiabilidade, qualidade, disponibilidade, segurança, custos e reduzido impacto ambiental (Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-5460 – Sistemas Elétricos de Potência – Terminologia). Em suma, os itens anteriormente citados são definidos por:

- a) Confiabilidade: representa a probabilidade de componentes e sistemas realizarem suas funções por um dado período de tempo sem falhar. Representa também o tempo que o componente ou sistema levará para falhar (%);
- b) Qualidade: é determinada pela compatibilidade entre o sistema de geração e a carga consumidora, atendendo a critérios de conformidade senoidal (VIEIRA 2013).
- c) Disponibilidade: definida como a probabilidade que o sistema esteja operando de forma adequada quando este for solicitado para uso;
- d) Segurança: capacidade de o sistema responder quando submetido a distúrbios negativos. Em outras palavras, é a habilidade do sistema operar, mesmo após ser sujeito a contingências;
- e) Custos: representa o melhor custo benefício na elaboração do projeto de um sistema elétrico de potência (VIEIRA 2013).
- f) Reduzido impacto ambiental: determina que o projeto de um sistema elétrico de potência deve seguir normas rígidas sobre os impactos da implantação do sistema elétrico de potência no meio ambiente (VIEIRA 2013).

No Brasil, a transmissão de energia é composta por linhas de transmissão e distribuição, estas possibilitam a interligação dos centros de geração e consumo, que segundo estimativas do N3E/MME, até o final do ano de 2015 cobriam 99,3% dos domicílios do território nacional.

O estado de Minas Gerais possui uma capacidade de geração de energia elétrica de aproximadamente 20.009.842 kW de potência, o que representa 16,1% da capacidade instalada no Brasil. A Cemig, por intermédio de suas controladas e coligadas de transmissão de energia elétrica, opera uma rede de transmissão de 7506 km, fato que a leva ser o terceiro maior grupo de transmissão de energia do Brasil. A Cemig desenvolve atividades de

distribuição de energia elétrica em 774 municípios e 5415 localidades do estado de Minas Gerais, atendendo cerca de 96% do território do estado (SANTOS 2011).

O desempenho de uma linha de transmissão resulta de suas características físicas que, por sua vez, determinam seu comportamento. Sendo assim, na subseção 2.1.1 são abordadas as características de uma linha de transmissão.

### 2.1.1 Características gerais de uma linha de transmissão

As linhas aéreas de transmissão podem ser divididas em duas partes: a parte passiva, formada por ferragens, isoladores e estruturas (torres), que proporciona o afastamento dos condutores do solo e entre si, e a parte ativa representada pelos cabos condutores que são os agentes do transporte de energia. Compõe, também, a linha de transmissão aérea, outros componentes como cabos para-raios e aterramentos (SANTOS 2011).

As estruturas metálicas de linhas de transmissão podem ser classificadas quanto ao número de circuitos (um ou dois circuitos), quanto à disposição dos condutores (triangular, vertical e horizontal), quanto à função na linha (estrutura de suspensão, estrutura de ancoragem e estrutura em ângulo), quanto à tensão da linha, quanto ao formato (tronco-piramidal de circuito simples e duplo, delta e estaiada) e quanto à resistência mecânica das estruturas (BARBOSA et al, 2007).

O nível de tensão, número de circuitos por torre, cadeias e isoladores, cabos para-raios, ferragens, entre outros, são fatores que influenciam na escolha de uma configuração geométrica ideal para linhas de transmissão aéreas. Ademais, a busca por um menor impacto ambiental deve ser considerada, sendo assim, deve atender aos aspectos de segurança relacionados aos níveis de campos eletromagnéticos gerados, nível de ruídos audível e radio interferência (BARBOSA et al, 2007).

Um dos primeiros estágios para projetar uma linha de transmissão aérea, é a definição do traçado. Faz-se, então, o levantamento topográfico do terreno a fim de extrair informações como: perfil do terreno e solo, cadastro de propriedades, indicação de obstáculos, etc., com o propósito de garantir a segurança e confiabilidade do sistema, do meio ambiente e das pessoas (PIRES, 2005).

Em um segundo momento dessa etapa do projeto de uma linha de transmissão aérea, ainda é necessário a definição da faixa de passagem ou servidão que corresponde a uma faixa de terra ao longo de toda a linha de transmissão, onde é proibida a construção de quaisquer

estruturas. A faixa de passagem é essencial para um bom desempenho da linha de transmissão e a segurança de seres vivos (CPFL, 2007).

As faixas de servidão das linhas de transmissão, nos casos mais comuns, têm largura mínima de 30 metros (15 metros para cada lado do eixo em relação à torre) para valores de tensões iguais a 69, 68 e 138 kV. Para linhas de transmissão com tensões de 34,5 kV, a faixa de passagem mínima é de 20 metros (10 metros para cada lado do eixo em relação à torre). Para linhas de transmissão com tensões acima de 138 kV a faixa de servidão depende do tipo da torre a ser instalada. Com base nestas informações, o projeto da linha deve definir a locação das torres neste perfil, etapa esta que se dá através de tais análises: minimizar a quantidade de torres; espaçar as torres de maneira uniforme; evitar locação de torres em locais com terreno muito acidentados, úmidos ou em processo de erosão; garantir a distância mínima dos cabos ao solo; evitar paralelismo entre linhas de transmissão, linhas férreas, cercas de arames etc. (CPFL, 2007).

Na próxima subseção, *Apresentação das linhas sob estudo*, são mostradas os três perfis de linhas de transmissão que são usadas ao longo deste trabalho. Estas representam configurações geométricas reais de algumas linhas de transmissão do território de Minas Gerais utilizadas pela Cemig e Furnas.

## **2.2 Apresentação das linhas sob estudo**

Neste trabalho são utilizadas configurações reais de algumas linhas de transmissão, que como já dito anteriormente, também usadas pela Cemig e Furnas. Suas descrições são exibidas por figura da silhueta da torre.

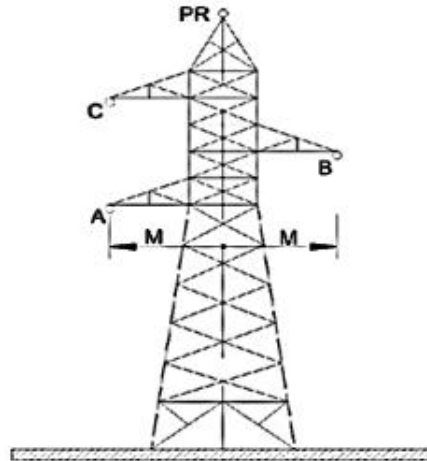
Normalmente, ao longo do trajeto das linhas de transmissão diversos tipos de torres são utilizadas em função de diferentes formações de relevo (SANTOS, 2011), sendo assim, a figura da silhueta das torres são apresentadas, neste trabalho, no seu trajeto mais comum, em seguida, as configurações elétrica e geométrica são detalhadas em um quadro.



## A. Sistema 1 – Linha de transmissão Janaúba – Salinas (138 kV)

### A.1 – Silhueta mais utilizada no percurso da linha do Sistema 1, Figura 1.

Figura 1: Silhueta da torre do Sistema 1  
Linha de Transmissão de 138 kV.



Fonte: SANTOS (2011).

### A.2 – Dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores e cabos para-raios, Quadro 1

Quadro 1: Características geométricas e elétricas do Sistema 1  
Linha de Transmissão trifásica circuito simples de 138 kV.

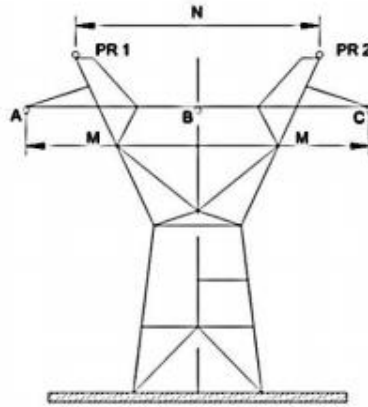
<b>Características geométricas e elétricas – Sistema 1</b>	
Tensão de operação	138 kV
Potência máxima transmitida	35 MVA
Corrente de operação	146,43 A
Comprimento da linha	140 km
Nº de condutores/fase	1
Código dos condutores fase	Linnet
Tipo dos condutores fase	CAA
Nº de cabos para-raios (PR)	1
Tipo de cabos para-raios	Aço galvanizado
Código do condutor para-raios	EHS
Distância entre subcondutores	0
Altura média fase A	12,15 m
Altura média fase B	14,01 m
Altura média fase C	15,87 m
Altura média cabos para-raios	22,90 m
Diâmetro cabos Fase	18,31 mm
Diâmetro cabos para-raios	7,94 mm
Vão Médio	400 m
M	3,00 m

Fonte: Adaptado por VIEIRA (2013).

## B. Sistema 2 – Linha de transmissão Pimenta – Barbacena (345 kV)

### B.1 – Silhueta mais utilizada no percurso da linha do Sistema 2, Figura 2.

Figura 2: Silhueta da torre do Sistema 2  
Linha de Transmissão de 345 kV.



Fonte: SANTOS (2011).

### B.2 – Dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores e cabos para-raios, Quadro 2.

Quadro 2: Características geométricas e elétricas do Sistema 2  
Linha de Transmissão trifásica circuito simples de 345 kV.

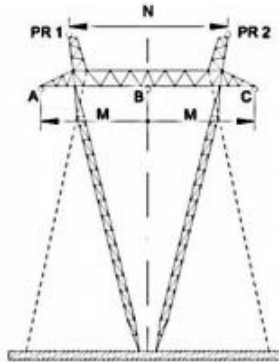
<b>Características geométricas e elétricas – Sistema 2</b>	
Tensão de operação	345 kV
Potência máxima transmitida	250 MVA
Corrente de operação média	418,3 A
Comprimento da linha	231 km
Nº de condutores/fase	2
Código dos condutores fase	CAA
Tipo dos condutores fase	<i>Rail</i>
Nº de cabos para-raios (PR)	2
Tipo de cabos para-raios	Aço Galvanizado
Código do condutor para-raios	3/8 EHS
Distância entre subcondutores	0,457 m
Altura média fase A	14,00 m
Altura média fase B	14,00 m
Altura média fase C	14,00 m
Altura média cabos para-raios	18,95 m
Diâmetro cabos Fase	29,59 mm
Diâmetro cabos para-raios	9,52 mm
Vão Médio	413 m
M	9,50 m
N	13,70 m

Fonte: Adaptado por VIEIRA (2013).

### C. Sistema 3 – Linha de transmissão São Gonçalo – Ouro Preto 2 (500 kV)

#### C.1 – Silhueta mais utilizada no percurso da linha do Sistema 3, Figura 3

Figura 3: Silhueta da torre do Sistema 3  
Linha de Transmissão de 500 kV.



Fonte: SANTOS (2011).

#### C.2 – Dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores e cabos para-raios, Quadro 3.

Quadro 3: Características geométricas e elétricas do Sistema 3  
Linha de Transmissão trifásica circuito simples de 500 kV.

<b>Características geométricas e elétricas – Sistema 2</b>	
Tensão de operação	500 kV
Potência máxima transmitida	725 MVA
Corrente de operação média	837,15 A
Comprimento da linha	120,31 km
Nº de condutores/fase	3
Código dos condutores fase	CAA
Tipo dos condutores fase	<i>Ruddy</i>
Nº de cabos para-raios (PR)	2
Tipo de cabos para-raios	Aço Galvanizado
Código do condutor para-raios	7/16 EHS
Distância entre subcondutores	0,457 m
Altura média fase A	16,53 m
Altura média fase B	16,53 m
Altura média fase C	16,53 m
Altura média cabos para-raios	30,71 m
Diâmetro cabos Fase	28,74 mm
Diâmetro cabos para-raios	11,11 mm
Vão Médio	468,13 m
M	10,25 m
N	14,50 m

Fonte: Adaptado por VIEIRA (2013).

Algumas observações, referentes às configurações geométricas devem ser levadas em consideração, são elas:

- a) A altura média ( $H_m$ ) dos condutores de uma linha de transmissão em relação ao solo é calculada através da Equação 1.

$$H_m = h_{\max} - \frac{2}{3}F \quad (1)$$

em que  $F$  é a flecha e  $h_{\max}$  é a altura máxima do condutor da torre, (FUSHS,1977; HEDMAN, 1983). Logo, a altura média considera o cálculo da flecha, que corresponde à distância ortogonal do ponto mínimo da catenária (curva descrita pelo condutor) ao vão nivelado, (SANTOS 2011), de acordo com a Figura 4.

Figura 4: Altura média dos condutores.



Fonte: Adaptado por VIEIRA (2013).

Para calcular o valor da flecha ( $F$ ) utiliza-se a Equação 2 (CAVASSINI, 2011):

$$F = \frac{pA_e^2}{8T_0} [\text{m}] \quad (2)$$

onde  $p$  é o peso próprio do cabo em kgf/m,  $A_e$  é o vão em questão em metros e  $T_0$  é a tração sobre a qual o cabo está submetido, kgf.

- b) No caso de linhas de transmissão que possuem múltiplos subcondutores, dispostos em feixe, o cálculo do raio equivalente desse condutor é realizado com base no método do Raio Médio Geométrico (RMG), onde fica definido que o condutor equivalente ao feixe está a uma altura igual ao centro da circunferência do feixe (STEVENSON, 1974). As Equações (3), (4) e (5) são listadas abaixo e representam, respectivamente, o cálculo do raio equivalente para cabos com dois, três e quatro subcondutores.

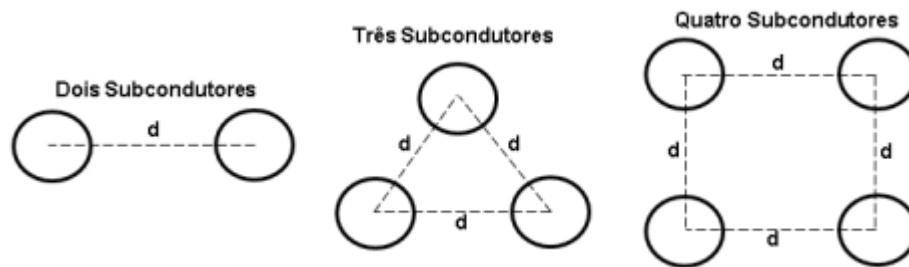
$$\text{RMG} = \sqrt{D_s d} \quad (3)$$

$$\text{RMG} = \sqrt[3]{D_s d^2} \quad (4)$$

$$\text{RMG} = 1,09^4 \sqrt{D_s d^3} \quad (5)$$

onde RMG é o raio condutor equivalente,  $D_s$  é o raio dos condutores individuais e  $d$  é a distância entre subcondutores. A Figura 5 mostra a disposição de cabos múltiplos para dois, três e quatro subcondutores.

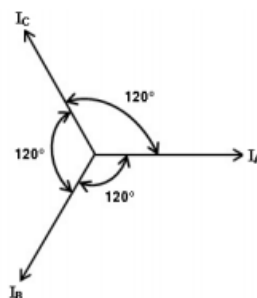
Figura 5: Cabo com condutor múltiplo.



Fonte: VIEIRA, (2013).

c) As correntes nas fases do sistema sob estudo são calculadas considerando-o como simétrico e equilibrado (VIEIRA, 2013). As fases estão colocadas na sequência positiva de fase ABC, como a Figura 6 ilustra:

Figura 6: Fases ABC em um sistema trifásico, simétrico e equilibrado.



Fonte: (VIEIRA, 2013).

A princípio o cálculo da corrente (FUCHS,1977), pode ser expresso matematicamente pela Equação 6:

$$I = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}V} \quad (6)$$

onde  $S_{3\phi}$  é potência trifásica e  $V$  é a tensão fase-fase da linha de transmissão.

Finalmente, é feito o defasamento das correntes nas fases A, B e C (FUSHS, 1977), como mostrado na Equação 7.

$$\begin{aligned} I_A &= I \angle 0^\circ \\ I_B &= I \angle -120^\circ \\ I_C &= I \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (7)$$

### 3 MODELAGEM MAGNÉTICA PARA CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO

#### 3.1 Introdução

Para o cálculo da interferência magnética entre linhas de transmissão operando em regime permanente, é feita uma modelagem eletromagnética. Por sua vez, a modelagem eletromagnética adotada utiliza as Equações de Maxwell, como base (SADIKU, 2004). Ainda, para se calcular tais interferências magnéticas, faz-se uso de métodos adicionais como, método das imagens complexas e teorema da superposição.

As Equações de Maxwell descrevem o comportamento eletromagnético de um sistema elétrico. Em frequências industriais (50/60 Hz) o efeito do campo elétrico pode ser desacoplado do campo magnético, ou seja, calculados separadamente (SCHROEDER, 1996). Sendo assim, de acordo com o sistema de operação proposto nesse trabalho, as Equações de Maxwell são analisadas de forma simplificada e desacoplada.

Sabe-se que em baixas frequências, como a que está sendo utilizada nesse trabalho, as dimensões elétricas são pequenas, uma vez que, o intervalo da linha é muito menor que o comprimento de onda (PAUL, 2006; CASACA 2007), assim sendo, opta-se para calcular apenas as interferências proveniente do campo magnético.

#### 3.2 Premissas e limites de validade

Em toda modelagem magnética são desenvolvidas aproximações matemáticas e/ou físicas (VIEIRA, 2013), que por sua vez obedecem limites de validade de aplicação. Logo, torna-se necessário apresentar premissas que definem tais limite de validade de todo equacionamento existente nas subseções seguintes. São elas:

- a) Linha de transmissão: suas características gerais são trifásica, aérea, simétrica, balanceada e uniforme. Opera em regime permanente senoidal, com frequência de 60 Hz. As tensões aplicadas aos condutores fase da linha de transmissão são equilibradas, ou seja, com mesma amplitude, defasadas  $120^\circ$  no tempo, com sequência ABC (tendo a fase A como referencial). A influência dos cabos para-raios são desconsiderados, devido a baixa frequência;
- b) Meios onde o sistema sob estudo está inserido (ar/solo): sua condutividade, permissividade e permeabilidade são consideradas homogêneas, lineares e isotrópicas. Suas propriedades

eletromagnéticas não variam com a posição, intensidade e orientação do campo aplicado e a modelagem do solo é a proposta por A. Deri (1981);

- c) Domínio na qual os cálculos são realizados: devido à operação em regime permanente senoidal do sistema de transmissão, os cálculos são feitos no domínio fasorial (ou domínio da frequência);
- d) Efeito do solo no cálculo do campo magnético e no retorno de corrente: o solo é considerado, para esse estudo, um condutor elétrico perfeito, ou seja, considera-se o mesmo com condutividade infinita.

### 3.3 Lei de Ampère.

A formulação da Lei de Ampère, atribuída a André-Marie Ampère, estabelece que a integral de linha do componente tangencial de campo magnético ( $\vec{H}$ ) em torno de um caminho fechado é igual a corrente ( $I$ ) envolvida pelo caminho, (LOEB, 1965). Uma vez que,  $I$  só possui natureza condutiva (VIEIRA, 2013), dá-se a necessidade do conhecimento das correntes nos condutores fase e nos cabos para-raios.

É notável que, para o cálculo do campo magnético deve-se ter como auxílio a Lei de Ampère, assim sendo,  $\vec{H}$  pode ser calculado através da Equação 8, aplicada a um condutor filamental de comprimento infinito.

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi\rho} \hat{a}_\phi \quad (8)$$

onde  $I$  é a corrente que circula pela linha de transmissão,  $\rho$  é a distância vertical entre o ponto da fonte e o ponto de observação do campo magnético e  $\hat{a}_\phi$  é o vetor unitário que indica a direção e sentido do campo magnético no ponto de observação, o qual é determinado de acordo com a Equação 9.

$$\hat{a}_\phi = \hat{a}_L \times \hat{a}_\rho \quad (9)$$

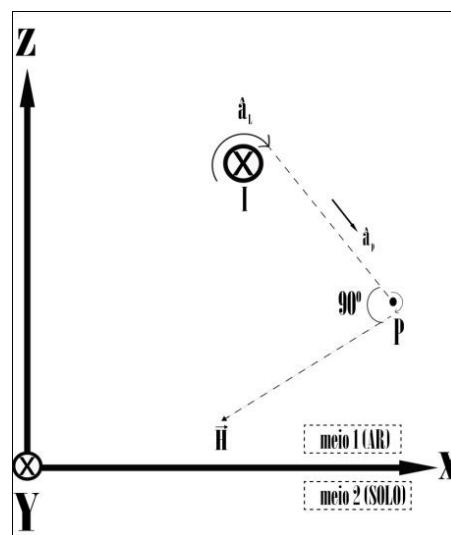
onde  $\hat{a}_L$  é o vetor unitário que define direção e sentido do fluxo ordenado de corrente elétrica ao longo do condutor filamental e  $\hat{a}_\rho$  é o vetor unitário que caracteriza a direção e o sentido do vetor cuja origem corresponde ao ponto do condutor filamental determinado pela projeção



ortogonal do ponto de observação do campo magnético (P) no condutor e a extremidade é o próprio ponto de observação.

Um sistema físico real monofásico onde é aplicada a Lei de Ampère para determinação do campo magnético no ponto P, é ilustrado pela Figura 7. Tal sistema de eixos é utilizado em todas as representações geométricas deste trabalho.

Figura 7: Sistema físico real monofásico generalizado para cálculo do campo magnético, composto por 2 meios semi-infinitos: ar para  $z > 0$  e solo para  $z < 0$ . A linha de transmissão se estende ao longo do eixo y.



Fonte: o autor.

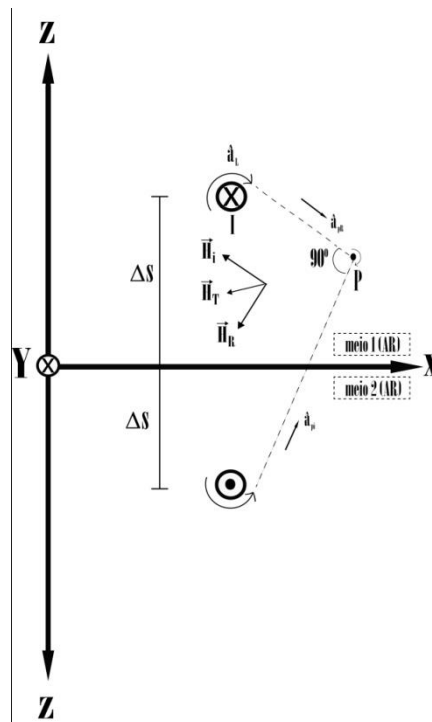
A Equação 8 só é válida para o cálculo do campo magnético gerado por uma linha imersa em um único meio (infinito em todas as direções) (VEIRA, 2013). O sistema sob estudo (Figura 7) é constituído pelo meio ar e solo (dois meios semi-infinitos). Sendo assim, é crucial a inclusão destes, na expressão do campo magnético. Tal inclusão é realizada segundo a aplicação Método das Imagens.

### 3.4 Método das Imagens

O Método das Imagens, técnica desenvolvida por Lord Kelvin em 1848, é usada para algumas grandezas eletrostática, tais como potencial elétrico, campo elétrico e densidade de fluxo elétrico (SADIKU, 2004). No estudo da magnetostática, este método é utilizado para representar correntes que penetram no solo, que influenciam os valores do campo magnético no ponto de observação (VIEIRA, 2013).

A teoria das imagens designa uma substituição da configuração de corrente, próxima a um plano infinito, pela sua própria configuração de corrente, por sua imagem, e por uma superfície equipotencial no lugar do plano condutor (SADIKU, 2004). A Figura 8 mostra o resultado da aplicação do Método das Imagens no sistema da Figura 7. É notável o fato da superfície do solo corresponder a um “plano de reflexão”.

Figura 8: Método das Imagens para um sistema monofásico.



Fonte: o autor.

É possível perceber que o Método das Imagens permite a transformação de um sistema físico real, composto por dois meios (ar e solo), em um sistema único e equivalente, composto por somente um meio infinito que é o ar.

Utilizando o Método das Imagens e a Lei de Ampère, no sistema físico sob estudo, nota-se que o campo magnético é resultado da superposição do campo magnético gerado pelas correntes reais e do campo magnético gerado pelas imagens. A Equação 10 e Equação 11 mostram essa superposição.

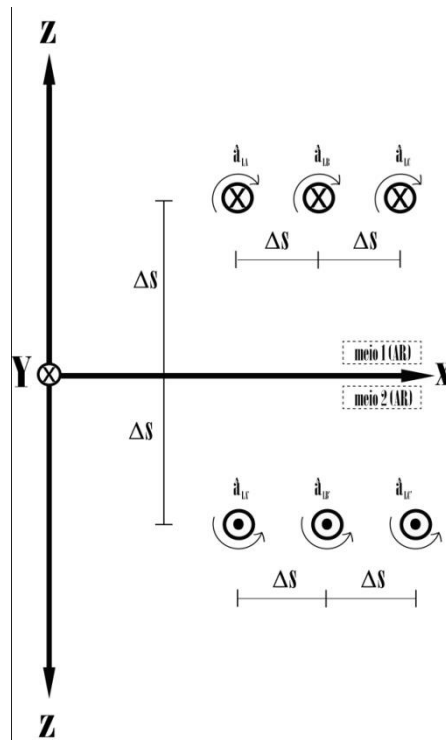
$$\vec{H}_T = \vec{H}_R + \vec{H}_I \quad (10)$$

$$\vec{H}_T = \frac{I}{2\pi\rho_R} \hat{a}_{\phi_R} + \frac{I}{2\pi\rho_I} \hat{a}_{\phi_I} \quad (11)$$

Para o caso de uma linha de transmissão trifásica, o campo magnético é constituído por 6 componentes, sendo 3 devido às correntes reais (A, B e C) e outras 3 devido às suas respectivas imagens (A', B' e C'), como ilustra a Figura 9. Por sua vez, a Equação 11 pode ser reescrita através da Equação 12.

$$\vec{H}_T = \sum_{i=1}^3 \frac{I}{2\pi\rho_R} \hat{a}_{\phi_R} + \sum_{i=1}^3 \frac{I}{2\pi\rho_I} \hat{a}_{\phi_I} \quad (12)$$

Figura 9: Método das Imagens para um sistema trifásico.



Fonte: o autor.

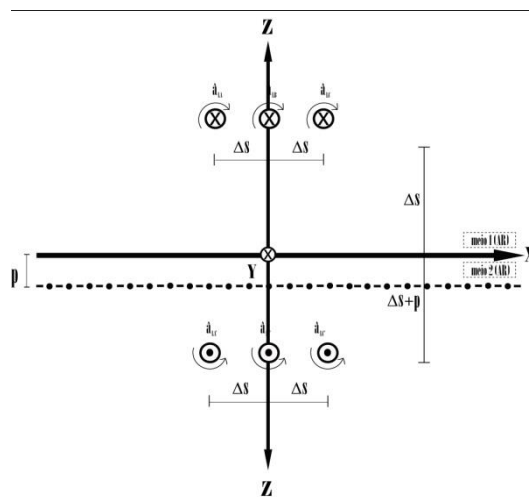
Na avaliação feita nessa subsecção é notável o fato da não consideração do efeito solo. Mesmo em baixa frequência essa avaliação torna-se inconsistente (VIEIRA, 2013), sendo assim, a próxima subsecção aborda a inclusão do efeito solo por meio do conceito plano de retorno complexo de A. Deri (1981).

### 3.5 Inclusão do efeito do solo via método de A. Deri

As correntes nos condutores de uma linha de transmissão geram campos magnéticos que penetram no solo (SCHROEDER, 1996). Para que tal efeito seja incluído na configuração do sistema proposto neste trabalho, utiliza-se o Método das Imagens Complexas de A. Deri (1981). Esta opção deve-se ao fato de que a modelagem desenvolvida por A. Deri e outros apresenta resultados muito semelhantes e bem simplificados se comparados a outros métodos presentes na literatura (LÚCIO, 2012).

O Método das Imagens Complexas consiste na concepção de um plano complexo de retorno de corrente, que se encontra abaixo do solo. Por sua vez, o plano possui condutividade infinita, situado a uma distância  $p$  (profundidade de penetração complexa) (SCHROEDER, 1996), ilustrado na Figura 10 (para uma linha de transmissão trifásica e horizontal) e expresso matematicamente pela Equação 13.

Figura 10: Método das Imagens Complexas de A. Deri et al.



Fonte: o autor.

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_S + j\omega\epsilon_S)}} \quad (13)$$

onde:

- a)  $\omega$ : frequência angular ( $2\pi f$ ), dada em  $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$ ;
- b)  $\mu_0$ : permeabilidade magnética do vácuo,  $4\pi \times 10^{-7} \left[\frac{\text{H}}{\text{m}}\right]$ ;
- c)  $\sigma_S$ : condutividade do solo, dada em  $\left[\frac{\text{S}}{\text{m}}\right]$ ;

d)  $\epsilon_S$  : permissividade elétrica do solo, dada em  $\left[\frac{F}{m}\right]$ ;

Em baixas frequências, onde a densidade de corrente de deslocamento do solo é desconsiderada, a Equação 13 pode ser substituída pela Equação 14.

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0 \sigma_S}} = \sqrt{\frac{\rho_S}{j\omega\mu_0}} \quad (14)$$

onde  $\rho_S$  representa a resistividade do solo.

A mudança na formulação final para o cálculo do campo magnético total se dá com a alteração somente das distâncias entre o ponto de observação e os pontos de fonte, devido à inclusão da profundidade complexa “p” (DERI, 1981). Assim, a expressão do campo magnético é dada pela Equação 15.

$$\vec{H}_t = \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi(\rho_{R_i})^2} (h_p - h_i, 0, x_i - x_p) + \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi(\rho_{I_i})^2} (-h_p - h_i, 0, x_i - x_p) \quad (15)$$

onde  $|I_i|$  e  $\theta_i$  correspondem ao módulo e ângulo da corrente em cada condutor do sistema sob análise, respectivamente;  $h_p$  é a altura, em relação ao solo, do ponto de observação (P) de campo magnético;  $h_i$  é altura do i-ésimo condutor que transporta a i-ésima corrente;  $x_i$  e  $x_p$  são as posições horizontais do i-ésimo condutor e do plano de observação (tomadas em relação a alguma referência, onde  $x = 0$ ), respectivamente;  $\rho_{R_i}$ ,  $\rho_{I_i}$  e  $\rho$  são distância da corrente real ao ponto em análise, distância da corrente imagem ao ponto de análise e profundidade complexa, respectivamente.

### 3.6 Equação final de $\vec{H}$ e $\vec{B}$ pelo Método Aproximado

O campo magnético  $\vec{H}$  e a densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$ , gerados pelas correntes nos condutores de linhas de transmissão, operando em regime permanente, podem ser expressos tanto no domínio do tempo, quanto no domínio fasorial (VIEIRA, 2013). Para representar tais grandezas no domínio do tempo e no domínio fasorial, são essenciais três parâmetros: amplitude, frequência e defasagem angular.

A Equação 16 relaciona diretamente  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$  da seguinte forma:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (16)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo e  $\vec{B}$  a força magnética por unidade de elemento de corrente (SADIKU, 2004).

Para calcular o campo magnético total (ou resultante) de um determinado ponto, vários métodos podem ser utilizados, como o Método das Elipses e Método no Domínio do Tempo, porém o trabalho utiliza o Método Aproximado, pelo fato deste ser o ideal quando necessita de uma grande quantidade de processamentos, agilizando-se, assim, o resultado procurado.

O Método Aproximado é um método utilizado para cálculo de campo magnético, onde se leva em consideração apenas módulos finais dos máximos valores de  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$ . A modelagem do solo pelo plano Complexo de A. Deri ocasiona valores adicionais de  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$  de modo complexo, possuindo uma parte real e uma parte imaginária para componentes ao longo do eixo xz, representados da Equação 17 e Equação 18.

$$\vec{H}_X = \sqrt{\vec{H}_{RX}^2 + \vec{H}_{IX}^2} \quad (17)$$

$$\vec{H}_Z = \sqrt{\vec{H}_{RZ}^2 + \vec{H}_{IZ}^2} \quad (18)$$

As Equações (19) e (20) possibilita o cálculo dos campos  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$  resultantes, definindo o que se entende por “Método Aproximado”.

$$\vec{H}_{MAX} = \sqrt{\vec{H}_X^2 + \vec{H}_Z^2} \quad (19)$$

$$\vec{B}_{MAX} = \mu_0 \vec{H}_{MAX} \quad (20)$$

#### 4 NORMAS A EXPOSIÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS

#### 4.1 Normas existentes

Seria muito perigoso se não houvesse um estudo sobre exposição de seres vivos a campos eletromagnéticos, e foi por isso que em 1996 a Abricem iniciou um projeto de pesquisa a fim de criar uma regulamentação para exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz, abrangendo a faixa dos sistemas de informática, radiodifusão e telecomunicações. Este projeto resultou em uma proposta de normalização que foi adotada pela Agência Nacional de Telecomunicação (ANATEL) através da publicação da resolução nº303, que estipula limites para exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos de radiofrequência (BELARDO et al, 2008).

Pesquisas isoladas sustentaram a hipótese de ocorrência da diminuição da produção noturna do hormônio melatonina, em pessoas submetidas a campos de 50 e 60 Hz. Essas pesquisas, por sua vez, levaram as organizações *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) e *World Health Organization* (WHO) concluírem que, até o momento, os dados disponíveis são insuficientes e inconsistentes para prover embasamento científico para o estabelecimento de restrições à exposição, (BELARDO et al, 2008).

Tomando como base as diretrizes para limitação da exposição a campo magnético, encontram-se vários órgãos que organizam e limitam valores de campo magnéticos. Dentre os órgãos regulamentares internacionais existentes, envolvendo organizações de diversos continentes, destaca-se a ICNIRP, sucessora da *International Radiation Protection Association* (IRPA) e de seu Grupo de Trabalho denominado *International Non-Ionizing Radiation Committee* (INIRC), porém outros podem ser destacados, como IEEE e ABNT, (ESMP, 2004).

O IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*) é uma organização de caráter predominantemente estadunidense, fundada em 1963, sem fins lucrativos, que desenvolve normas relacionadas a produtos e serviços nos setores de telecomunicação, tecnologia da informação e geração de energia. Apesar de terem sido criadas nos Estados Unidos, suas normas são consultadas e referenciadas em vários países, inclusive no Brasil. O IEEE-SA é um dos líderes em produção de normas técnicas, possuindo cerca de 1300 normas e projetos em desenvolvimento (DECKMANN; POMILIO, 2010).

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) é uma organização, fundada em 1940, privada e sem fins lucrativos, responsável pela normatização técnica no Brasil, sendo

inclusive a representante no país de entidades internacionais como, por exemplo, a IEC (DECKMANN; POMILIO, 2010).

ICNIRP é uma associação registrada em Munique, Alemanha, como uma organização sem fins lucrativos. É formalmente reconhecida como uma oficial colaboradora da Organização Não-Governamental (ONG) pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e da Organização Internacional do Trabalho (OIT). O ICNIRP é consultado pela Comissão Européia e está ligado a muitas outras organizações envolvidas na NIR (*Non-Ionizing Radiation Protection*), em todo o mundo, através de diversos projetos colaborativos (ICNIRP, 1974).

#### **4.11 Limites pertinentes e comparativos entre as normas**

O corpo humano está sujeito a densidade de correntes induzidas, quando submetidos a campos magnéticos, e por não ser eletricamente homogêneo, modela-se por métodos computacionais, que por sua vez, têm resolução anatômica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000).

Os níveis de exposição humana aos efeitos dos campos magnéticos são realizados baseados em relações entre efeitos biológicos e grandezas físicas. Segundo a ABNT, a grandeza física utilizada nesses casos é a densidade de corrente elétrica, que por sua vez, possui valor de referência igual a 100 mA/m<sup>2</sup> como limite para que excitações indesejáveis no sistema nervoso central comecem a aparecer. Assim, a partir da determinação desse parâmetro é estabelecido que na faixa de frequência entre 4 Hz e 1 kHz, o limite da exposição ocupacional de seres humanos deve ser limitado de uma densidade de corrente de no máximo 10 mA/m<sup>2</sup>. Ainda, para o público em geral adota-se um fator de segurança de valor 50, o que limita o valor máximo de densidade de corrente em 2 mA/m<sup>2</sup> (ICNIRP, 2001).

O valor limite de referência para os níveis máximos de corrente induzida em seres humanos, em frequências de até 2,5 kHz, é de 0,5 mA (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000). A OMS estabelece o valor de 1 mA como normal.

O Quadro 4 e o Quadro 5 fornecem um resumo dos valores limites de exposição de seres humanos a campos magnéticos, densidades de correntes e correntes induzidas, respectivamente.

Quadro 4: Valores limite de campos magnéticos, densidades de correntes e correntes induzidas para o público geral.



Parâmetro/Órgão	Valores para o público geral			
	ICNIRP	ABNT	NBR 15415	IEEE C95.6
Densidade de Fluxo Magnético ( $\mu\text{T}$ )	83,3	83,3	83,3	904
Densidade de Fluxo Magnético (mG)	833	833	833	9040
Densidade de Corrente ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	2	2	2	2
Corrente Induzida (mA)	0,5	0,5	-	0,5
<i>*Obs.: <math>1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG}</math></i>				

Fonte: ICNIRP (2001); ABNT (2000); NBR15145 (2006); IEEE-C95.6 (2002).

Quadro 5: Valores limite de campos magnéticos, densidades de correntes e correntes induzidas para exposição ocupacional.

Parâmetro/Órgão	Valores para exposição ocupacional			
	ICNIRP	ABNT	NBR 15415	IEEE C95.6
Densidade de Fluxo Magnético ( $\mu\text{T}$ )	416,6	416,6	-	2712
Densidade de Fluxo Magnético (mG)	4166	4166	-	27120
Densidade de Corrente ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	10	10	-	10
Corrente Induzida (mA)	1,0	1,0	-	1,5
<i>*Obs.: <math>1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG}</math></i>				

Fonte: ICNIRP (2001); ABNT (2000); NBR15145 (2006); IEEE-C95.6 (2002).

#### 4.2 Efeitos da exposição a campos magnéticos

Ao longo do tempo, vários estudos sobre efeitos dos campos elétrico e magnético em seres vivos foram realizados. Segundo VIEIRA (2013), os estudos realizados pela IEEE (1994) e ICNIRP (2001), trazem as seguintes conclusões:

- Há um surgimento de correntes induzidas em seres vivos expostos a campos elétricos e magnéticos, na frequência de 60 Hz, percorrendo de uma maneira não uniforme no corpo humano;
- Quando um campo magnético de 0,1 mG está sobre ação em um ser humano, o mesmo é submetido a uma densidade de corrente induzida de valor  $1\mu\text{A}/\text{m}^2$  (1000 vezes menor do que o valor da densidade de corrente que ocorre no corpo humano);
- Na literatura atual existente, não são encontrados referências experimentais e/ou teóricas sobre valores de densidade de corrente induzida em tecidos e células do corpo humano os quais reputam as propriedades elétricas do meio, tais como a condutividade e a permissividade;
- Não foram evidenciadas, cientificamente, o surgimento de câncer em animais quando estes foram expostos a campos elétricos e campos magnéticos na frequência de 60 Hz.

Estudos sobre efeitos da exposição humana a campos eletromagnéticos têm se expandido (VIEIRA, 2013), e para regulamentar níveis máximos de exposição, os órgãos já anteriormente citados regulamentam os valores de campo magnético, densidade de corrente e corrente induzida nos seres humanos e seus respectivos valores limites.

## **5 RESULTADOS E ANÁLISES**

## 5.1 Validação dos resultados

Validar os resultados obtidos torna-se importante, uma vez que, tal ato torna confiável os cálculos, as premissas e as simulações abordadas neste trabalho.

Como já foi dito anteriormente, o trabalho trata-se de desenvolver um programa computacional em *Matlab*®, que permite a realização de uma série de simulações, capaz de calcular os níveis de campos magnéticos baseado no Método Aproximado, mencionado no Capítulo 3.

Para validação do programa é atribuído a particularidade de comparação com os resultados computacionais divulgados na literatura. É notável, ainda, que o trabalho aborda três sistemas de linhas de transmissão, estas já mencionadas e explicadas no Capítulo 2.

## 5.2 Comparação com os resultados computacionais divulgados na literatura

### Por Hugo Rodrigues Vieira, 2013.

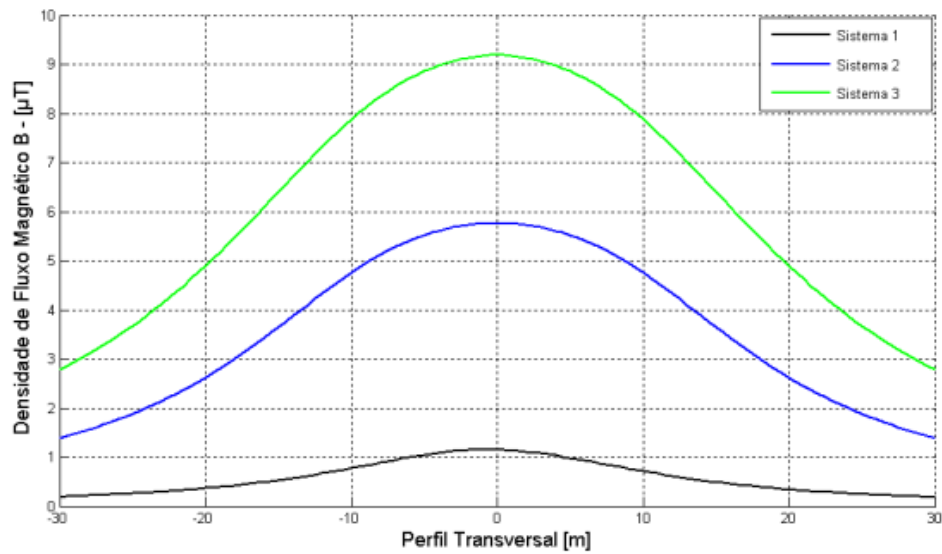
No ano de 2013, Hugo Rodrigues Vieira realiza um trabalho sobre acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos. Dentre muitas abordagens feitas, Vieira realiza uma avaliação dos campos magnéticos gerados a 1 metro do solo, para assim, auxiliar na determinação dos limites da faixa de passagem. O referente autor realiza uma modelagem de três linhas de transmissão (entre outras), e esboça os resultados das densidades magnéticas das mesmas, em um gráfico. Tal gráfico será usado como validação para os cálculos deste trabalho.

Os três sistemas trabalhados no gráfico são os mesmos demonstrados no Capítulo 2 através da Figura 1, 2 e 3, e têm suas características explicitadas da seguinte maneira:

- a) Sistema 1: Circuito simples, triangular, tensão de 138 kV e corrente 146,43 A;
- b) Sistema 2: Circuito simples, horizontal, tensão de 345 kV e corrente 418,3 A;
- c) Sistema 3: Circuito simples, horizontal, tensão de 500 kV e corrente 837,15 A.

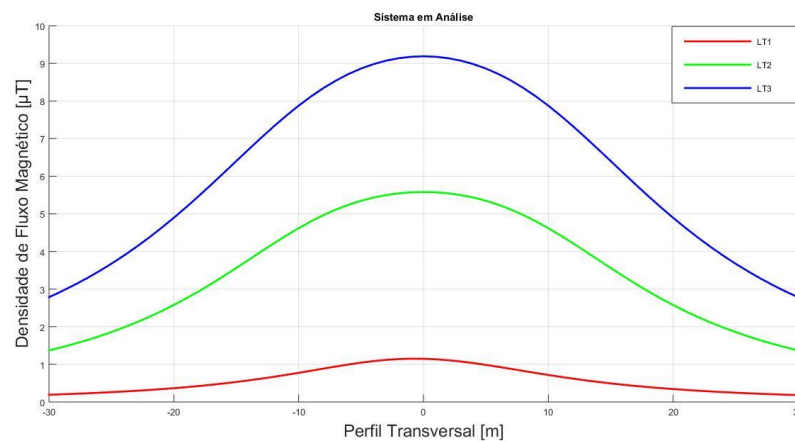
O gráfico da análise de sensibilidade do campo magnético do Sistema 1, 2 e 3 encontra-se na Figura 11. A Figura 12 retrata o gráfico gerado pelo programa computacional desenvolvido neste trabalho, onde a LT1, LT2 e LT3 representam linhas de transmissão que correspondem ao Sistema 1, Sistema 2 e Sistema 3, respectivamente. É necessário ressaltar, ainda, que para a resistividade do solo, considera-se o valor médio do estado de Minas Gerais (2400  $\Omega\text{m}$ ).

Figura 11: Análise de sensibilidade do campo magnético para os Sistemas 1, 2 e 3 com resistividade do solo de  $2400 \Omega.m$ .



Fonte: VIEIRA (2013).

Figura 12: Análise de sensibilidade do campo magnético para as LT's 1, 2 e 3 com resistividade de solo de  $2400 \Omega.m$ .



Fonte: o autor.

Os Quadros 6, 7 e 8 mostram os valores do campo magnético dos Sistemas 1, 2 e 3 em comparação com o campo magnético calculado em LT1, LT2 e LT3, respectivamente.

Quadro 6: Campo magnético do Sistema 1 em comparação com o campo magnético da LT1.

Campo Magnético ( $\mu T$ )	Sistema 1	LT1
-----------------------------	-----------	-----

<b>Posição – Valor Máximo</b>	-1 m	1,15	-1 m	1,15
<b>0</b>	1,14		1,15	
<b>Limite: - 30</b>	0,19		0,19	
<b>Limite: + 30</b>	0,18		0,18	

Fonte: o autor.

Quadro 7: Campo magnético do Sistema 2 em comparação com o campo magnético da LT2.

<b>Campo Magnético (<math>\mu\text{T}</math>)</b>	<b>Sistema 2</b>		<b>LT2</b>	
<b>Posição – Valor Máximo</b>	0 m	5,76	0 m	5,56
<b>0</b>	5,76		5,56	
<b>Limite: - 30</b>	1,38		1,37	
<b>Limite: + 30</b>	1,38		1,37	

Fonte: o autor.

Quadro 8: Campo magnético do Sistema 3 em comparação com o campo magnético da LT3.

<b>Campo Magnético (<math>\mu\text{T}</math>)</b>	<b>Sistema 3</b>		<b>LT3</b>	
<b>Posição – Valor Máximo</b>	0 m	9,18	0 m	9,19
<b>0</b>	9,18		9,19	
<b>Limite: - 30</b>	2,78		2,78	
<b>Limite: + 30</b>	2,78		2,78	

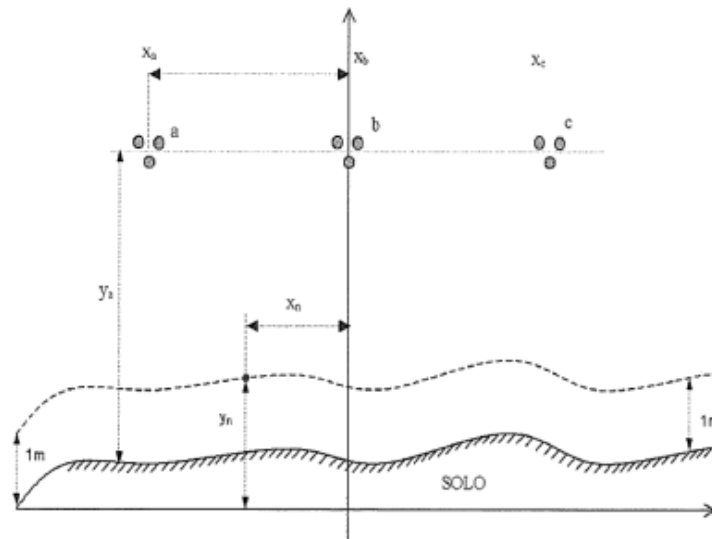
Fonte: o autor.

Nota-se a proximidade dos valores medidos e calculados; verifica-se informações satisfatórias e valida resultados obtidos neste trabalho.

### **Por Gernan Edson Guimarães, 2005.**

Em 2005, Gernan Edson Guimarães realiza um estudo sobre o ambiente eletromagnético de uma linha de transmissão de 500 kV operando em 60 Hz. A linha escolhida por Guimarães é a linha Neves 1 – Vespasiano 2, uma linha de transmissão real, onde o autor realiza medições de campo magnético, que por sua vez, também servem de validação para o programa desenvolvido neste trabalho. A linha de transmissão utilizada pelo autor é do tipo horizontal, trifásica, circuito simples, tensão de 500 kV e corrente de operação de 650 A. Tal linha tem sua configuração geométrica ilustrada pela Figura 13.

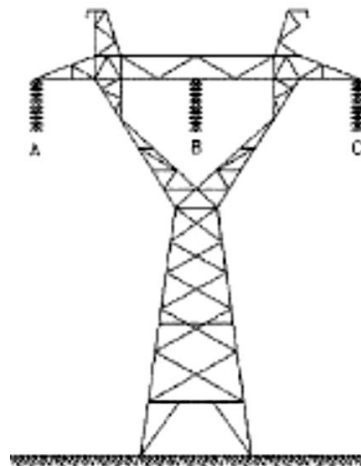
Figura 13: Geometria da Linha de Transmissão.



Fonte: GUIMARÃES (2005).

É notável que três subcondutores em cada fase compõem essa linha de transmissão, sendo que seu diâmetro é de 28,74 mm e tem um espaçamento entre as fases de 0,457 m. Adota-se ainda a fase B como eixo de simetria, sendo a mesma espaçada em 12 m de A e C. As alturas máxima e mínima estão a uma distância do solo de 25,26 m e 10,86 m respectivamente. A Figura 14 mostra a silhueta da linha de transmissão no vão onde são feitas as medições do campo magnético.

Figura14: Silhueta da linha de transmissão.



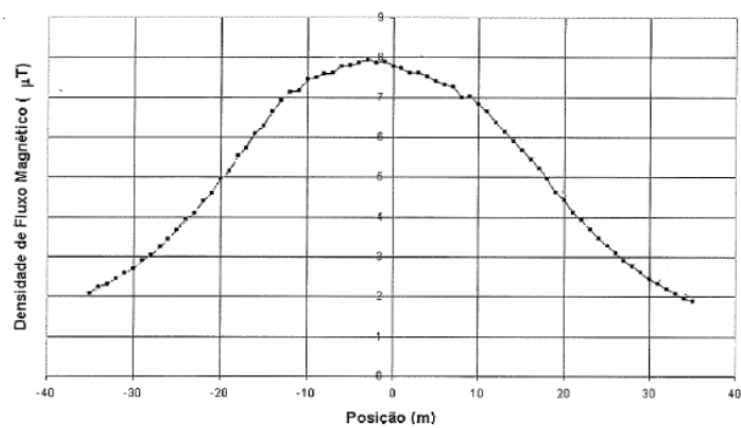
Fonte: GUIMARÃES (2005).

Para as medições do campo magnético, o autor realiza algumas considerações, são elas:

- a) Caracterização realizada baseada na medição de densidade de fluxo magnético (B) medida em  $\mu\text{T}$ .
- b) São observadas as curvas de carga da linha onde as medições são realizadas, Devido a grande variação da corrente da linha de transmissão durante o período em análise.

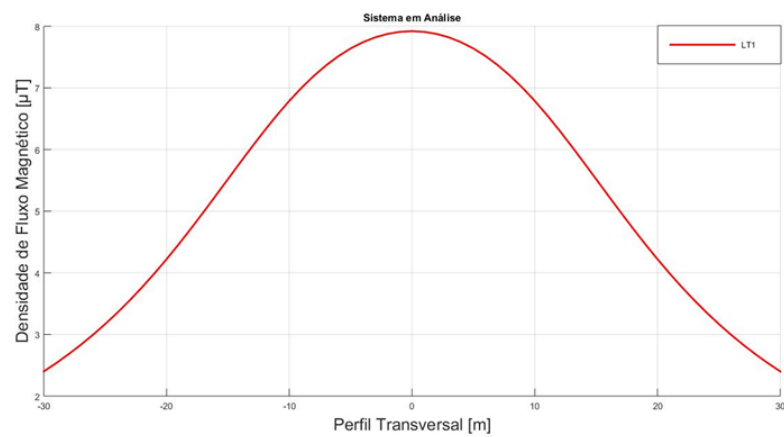
As Figuras 15 e 16 ilustram os resultados gerado por Guimarães e o resultando gerado pelo programa desenvolvido neste trabalho, respectivamente.

Figura 15: Perfil de campo magnético obtidos por medições.



Fonte: GUIMARÃES (2005).

Figura 16: Perfil do campo magnético obtido através do programa desenvolvido neste trabalho para a linha de transmissão da Figura 14.



Fonte: o autor.

O Quadro 9 ilustra as análises dos resultados visualizados na Figura 15 e Figura 16. É notável que os valores de medição realizados por Guimarães são bem próximos em comparação com o cálculo do programa utilizado neste trabalho.

Quadro 9: Comparação dos valores medidos por Guimarães e os cálculos deste trabalho.

Posição (m)	Medição ( $\mu\text{T}$ )		Cálculo ( $\mu\text{T}$ )	
	-1 m	8,00	0 m	7,92
<b>Valor Máximo – Pos/Val</b>				
<b>0</b>	7,80		7,92	
<b>Limite: - 30</b>	2,65		2,40	
<b>Limite: + 30</b>	2,60		2,40	

Fonte: o autor.

Nota-se a proximidade dos valores medidos e calculados; verifica-se informações satisfatórias e valida resultados obtidos neste trabalho.

### 5.3 Avaliação com os limites estabelecidos pelas normas

Avaliar se os limites de interferência magnética gerada pelas correntes de linhas de transmissão estão de acordo com as normas, mencionadas no Capítulo 4, é de suma importância para averiguar resultados positivos proveniente do programa proposto neste trabalho. Para isso, é necessário que o campo magnético seja medido e calculado a uma altura de 1 metro acima do nível do solo, o qual é a base para comparação com os níveis de segurança recomendados; fato este que justifica a opção por analisar o perfil do campo magnético, de forma transversal, a esta altura (VIEIRA, 2013).

Para uma análise mais fácil, toma-se como base o Quadro 10, que retrata os níveis de densidade de fluxo magnético a cada 10 metros de distância do ponto de referência (0 m), e as Figuras 17, 18 e 19.

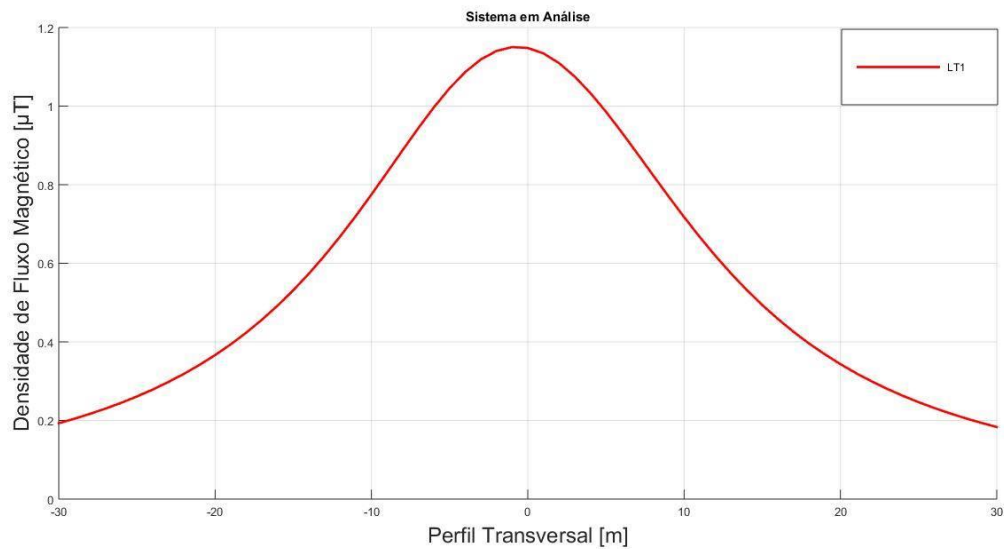
Quadro 10: Níveis de densidade de fluxo magnético da LT's 1, 2 e 3 a cada 10 metros de distância do ponto 0 m.

Posição (m)	LT 1 ( $\mu\text{T}$ )	LT 2 ( $\mu\text{T}$ )	LT 3 ( $\mu\text{T}$ )
<b>- 30</b>	0,193	1,372	2,783
<b>- 20</b>	0,366	2,577	4,895
<b>- 10</b>	0,775	4,620	7,875
<b>0</b>	1,148	5,555	9,187
<b>+ 10</b>	0,718	4,620	7,875
<b>+ 20</b>	0,344	2,577	4,895
<b>+ 30</b>	0,183	1,372	2,783

Fonte: o autor.



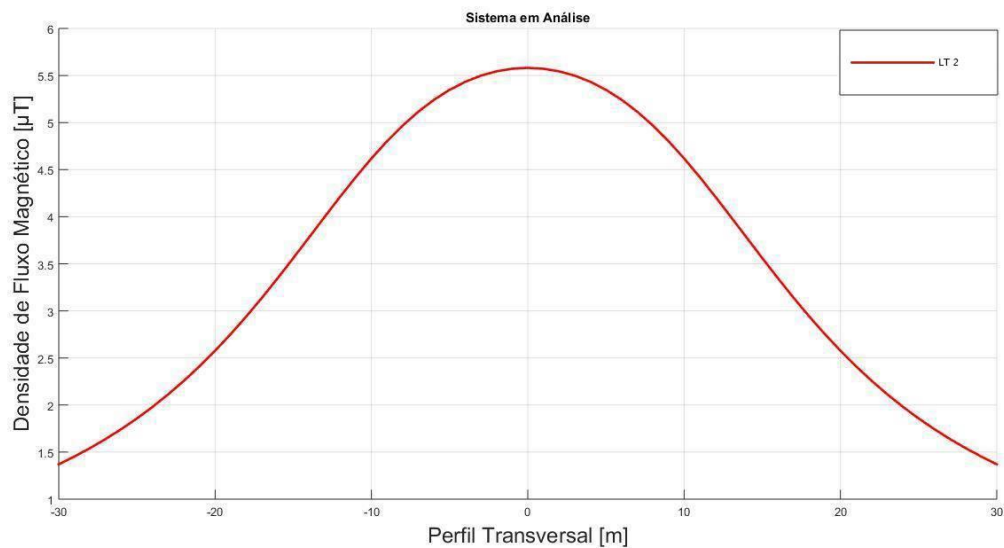
Figura 17: Densidade de fluxo magnético da LT 1.



Fonte: o autor.

Fica evidente que o sistema da LT 1 não tem seu valor de densidade de fluxo magnético máximo em 0 m, mas sim em  $-1$  m. Essa assimetria deve-se as suas características físicas/geométricas, e se encontra do lado esquerdo do gráfico. Nota-se também, que o campo magnético não ultrapassa os valores estabelecidos pelas normas, tendo seu máximo valor em  $1,148 \mu\text{T}$ .

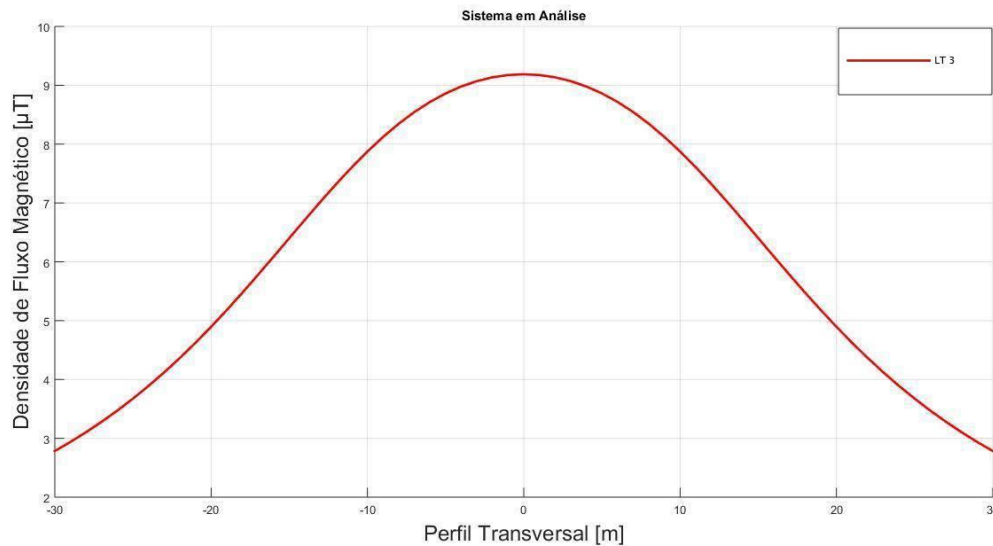
Figura 18: Densidade de fluxo magnético da LT 2.



Fonte: o autor.

É visto que diferente do sistema da LT 1, o sistema da LT 2 fornece um gráfico totalmente simétrico. Seu eixo de simetria retrata o ponto de valor máximo do campo magnético ( $5,555 \mu\text{T}$ ), que decai ao longo do afastamento deste ponto de referência, estando dentro dos limites exigidos pelas normas.

Figura 19: Densidade de fluxo magnético da LT 3.



Fonte: o autor.

Em consequência das características da LT 3, a densidade de fluxo magnético decai de forma mais rápida em comparação com as outras linhas. Respeitando os níveis de campo magnético limites durante toda sua faixa de passagem, o gráfico encontra-se simétrico e sua densidade de fluxo magnético máximo é de  $9,187 \mu\text{T}$ .

Verifica-se pelas Figuras 17, 18, 19 e pelo Quadro 10 que todos os valores apresentados estão dentro dos valores limites de exposição a seres vivos, segundo as normas já mencionadas neste trabalho. Sendo assim, algumas observações podem ser destacadas:

- a) As LT's 2 e 3 apresentam maiores valores para o campo magnético quando comparados a LT 1; isso deve-se ao fato de apresentarem maiores valores na corrente de operação. Isto, ainda, comprova a relação direta do campo magnético com a intensidade da corrente;
- b) As normas de avaliação da exposição a campos magnéticos não verificam a tensão e geometria da linha de transmissão, mas os valores do próprio campo magnético;
- c) A partir do ponto máximo do campo magnético, em todos os sistemas, o campo decresce rapidamente;
- d) Grande influência da geometria das LT's para os cálculos do campo magnético.

## 6 CONCLUSÃO E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

O presente trabalho desenvolve um programa computacional, feito no *Matlab*®, que possibilita o cálculo do campo magnético nas proximidades de linhas de transmissão operando em regime permanente.

Para desenvolver o programa, torna-se necessário o entendimento das configurações e características de cada linha de transmissão trabalhada, métodos existentes na literatura para cálculo do campo magnético e as normas a exposição do mesmo.

A ferramenta computacional possui, ainda, variabilidade de se poder analisar quaisquer tipos de sistemas de linha de transmissão, ou seja, é possível obter os resultados variando as geometrias e características elétricas da LT; para tais análises basta alterar os valores dos parâmetros de entrada do script de leitura do programa, tais como níveis de corrente, frequência de operação, alturas, dentre outros.

Observa-se, ainda, que a densidade de fluxo magnético, gerada na faixa de passagem dos três sistemas de linhas de transmissão abordadas neste trabalho, fornece valores que se encontram dentro das normas regulamentadoras para exposição de seres humanos a campos magnéticos. Os valores máximos encontrados, para cada sistema trabalhado, ficam abaixo dos valores limites exigidos pelas normas da seguinte forma: 98,62% e 99,72% abaixo do valor limite para público geral e exposição ocupacional, respectivamente, em LT1. 93,33% e 98,67% abaixo em LT2; 88,97% e 97,79% em LT3.

A grande diferença dos valores máximos de densidade de fluxo magnético dos sistemas deste trabalho para com os valores limites das normas, deve-se ao fato de os valores de corrente que fluem, dentro da faixa de passagem dessas linhas de transmissão, em função da potência, serem relativamente baixos, o que significa que as LT1, LT2 e LT3 podem transmitir uma potência maior, e ainda obter campos magnéticos dentro dos limites estabelecidos.

Algumas conclusões podem ser tomadas através de todo processo teórico e prático decorrido no trabalho, como: o perfil transversal é, em sua maioria, proporcional ao nível de corrente da linha de transmissão; o perfil transversal é totalmente sensível à configuração geométrica da linha de transmissão; para os três sistemas abordados neste trabalho, os níveis de campo magnético estão de acordo com as normas regulamentadoras de exposição de seres vivos.

O trabalho, ainda, possibilita implementações de continuidade, que em temas futuros possam ser abordados. São eles: técnicas de mitigação; trabalhar em médias/altas frequências

e com outras configurações de linhas, e por sua vez, exercer cálculos considerando não ideal a resistividade do solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Limites para a Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos Variáveis no Tempo (até 300 GHz)**. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15145: Métodos de medições de níveis de referencia para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 a 60 Hz**. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422: Projeto de linhas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 1985.
- BELARDO, C. A. et al. **Exposição Humana a Campos Elétricos e Magnéticos Gerados por Instalações Elétricas 50 e 60 Hz**. São Paulo: USP, 2008. 7 p.
- CASACA, J. F. G. **Cálculo do campo eletromagnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2007.
- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ (São Paulo, SP). **Orientação técnica: Linhas de Transmissão - Ocupação de Faixa de Passagem**. 2007.
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Curso Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Campinas: Unicamp, 2010. 12 p.
- DERI, A.; TEVAN, G.; SEMLYEN, A.; CASTANHEIRA, A. **The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi layer earth return**, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100*, pp. 3686-3694, August 1981.
- FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica**. Itajubá-MG: LTC/EFEL, 1977. 280 p. v. II.
- GUIMARÃES, G. E. **Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV**. 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2005.
- ICNIRP, **Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)**, International Commission on Non-ionizing Radiation Protection Technical Report, 2001
- IEEE, **644-1994. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC PowerLines**, New York: IEEE, 1994 (R2008), (IEEE Std. 644-1994).
- IEEE-C95.6, **Standart of Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 to 3Khz**, Piscataway, N. J.:Subcommittee3 of Standards Coordinating Subcommittee 28, 2002.
- LOEB, F. J. et al. **Prevention of muscle disuseatrophy by lowfrequency electrical stimulation in rats**: *IEEE Trans Neural Syst RehabilEng*, 2003. 286 p. v. II.

LÚCIOS S. M. Mendes, **Parâmetros longitudinais de linhas de transmissão: Análise dos efeitos do solo e da frequência para a aplicação em estudos de transitórios eletromagnéticos**. 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João Del Rey, São João Del Rey. 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**. Brasília: MME, 2015

NETO, A. M, et al. **Desenvolvimento e aplicação de metodologias para análise do desempenho de linhas de transmissão**. SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2007.

PAUL, C. R. **Eletromagnetismo para Engenheiros**. Belo Horizonte-MG: LTC, 2006. 400 p. v. II.

PIRES, L. F. A. **Gestão ambiental da implantação de sistemas de transmissão de energia elétrica – Estudo de caso: Interligação Norte/Sul I**. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2005.

SADIKU, M. N. O. **Elementos do Eletromagnetismo**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2012. p.702.

SANTOS, M. G. d. **Acoplamento elétrico entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos**. 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João Del Rey, São João Del Rey. 2011.

SCHROEDER, M. A. **Concepção de um sistema para extração de energia elétrica de Linhas de Transmissão através de acoplamento magnético**. 1996. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais. 1996.

STEVENSON JR, W. D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 4ª. ed. São Paulo - SP: McGraw-Hill, 1974. 347 p.

VIEIRA, H. R. **Acoplamento Magnético entre Linhas de Transmissão Operando em Regime Permanente e Dutos Metálicos Aéreos**. 2013. 158 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João Del Rey, São João Del Rey. 2013.