

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**HENRIQUE SILVA VILELA**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO  
CAMPO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA GEOMETRIA DA TORRE DE UMA  
LINHA DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE**

**Varginha**  
**2017**

**HENRIQUE SILVA VILELA**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO  
CAMPO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA GEOMETRIA DA TORRE DE UMA  
LINHA DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE**

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

**Varginha  
2017**

**HENRIQUE SILVA VILELA**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO  
CAMPO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA GEOMETRIA DA TORRE DE UMA  
LINHA DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE**

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

Aprovado em    /    /

---

Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira

---

Prof. Esp. Paulo Roberto Paiva Novo

---

Prof. Esp. Roberto Lazarino Mudesto

OBS.:

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, a minha amada mãe Elisabeth, meu irmão Breno, a minha sobrinha Letícia e a meu querido filho Carlos Henrique, lembrado que são meus melhores e maiores presentes. Esta vitória é muito mais de vocês do que minha!

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força, coragem e proteção durante toda esta longa caminhada. Agradeço também a todos os colegas, amigos e professores, que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira que de forma extenuante colaborou pela realização deste trabalho. À minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, sua presença, significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada, seu cuidado e dedicação foi que deram, em muitos momentos, a esperança para prosseguir. Agradeço ao mundo por mudar as coisas, por nunca fazê-las serem da mesma forma, pois assim não teríamos o que pesquisar, o que descobrir e o que fazer, sendo isso um incentivo para conseguir concluir meu trabalho.

“Aqueles que não ponderam são fanáticos,  
aqueles que não podem são tolos, e aqueles  
que não ousam são escravos.”

Lord Byron.

## RESUMO

Este trabalho realiza a modelagem matemática do campo magnético produzido devido às altas correntes de uma linha de transmissão, onde a mesma é simulada pelo programa computacional Matlab® para fins de análise da influência da geometria da linha de transmissão no valor final do campo magnético na faixa de passagem da própria linha. A modelagem é feita através de equações referenciadas e posteriormente aplicadas a um script no Matlab®. Para que este trabalho de pesquisa seja admissível, é necessário que alguns passos sejam realizados, que em conjunto correspondem à metodologia adotada, caracterizando o campo magnético das linhas de transmissão, operando em regime permanente, exibindo a modelagem eletromagnética entre linhas de transmissão através do Matlab® pelas equações de Maxwell, pelo método das imagens e o efeito do solo é considerado no plano complexo de retorno segundo Deri, visto que o campo magnético penetra o solo mesmo em baixas frequências. Tendo a validação dos cálculos e programas desenvolvidos por meio de comparação com resultados já existentes na literatura e estudos já realizados na área. Com esse trabalho verifica-se a influência da geometria da linha de transmissão no campo magnético e tais resultados são mostrados através de gráficos e tabelas. Para análises futuras o script desenvolvido poderá ser utilizado para verificação de conformidade dos valores de campo magnético com as normas regulamentadoras.

**Palavras-Chave:** Linhas de Transmissão. Campo magnético. Geometria das Linhas Aéreas.

## **ABSTRACT**

*This work performs the mathematical modeling of the magnetic field produced due to the high currents of a transmission line in Matlab® for the purpose of analyzing the influence of the transmission line geometry on the final value of the magnetic field in the band of the line itself. The modeling is done through equations referenced and later applied to a script in Matlab®. In order for this research work to be admissible, it is necessary that some steps are taken, which together correspond to the adopted methodology, characterizing the magnetic field of the transmission lines, operating in steady state, showing the electromagnetic modeling between transmission lines through Matlab® by the equations of Ampere, Maxwell, by the method of the images and the effect of the soil is considered in the complex plane of return according to Deri, since the magnetic field penetrates the ground even at low frequencies. With the validation of the calculations and programs developed, by means of comparison with already existing results in the literature and studies already carried out in the area. With this work the influence of the transmission line geometry in the magnetic field is verified and such results are intended to be shown through graphs and tables. For future analysis the developed script can be used to check the conformity of magnetic field values with regulatory standards.*

**Key-Words:** *Transmission Line. Magnetic Field. Geometry of Airlines.*



## **LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABRATE – Associação Brasileira de Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CAA – Condutor de Alumínio com alma de Aço

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CESP – Companhia Energética de São Paulo

CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco

CMSE – Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética

CPFL – Companhia Paulista Força e Luz

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FURNAS – Furnas Centrais Elétricas

ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection Technical Report

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

MME – Ministério de Minas e Energia

OMS – Organização Mundial de Saúde

RMG – Raio Médio Geométrico

SEP – Sistema Elétrico de Potência

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Altura Média dos Condutores.....	23
Equação 2 – Valor da Flecha Catenária .....	24
Equação 3 – Raio Médio Geometrico para 2 Condutores.....	24
Equação 4 – Raio Médio Geometrico para 3 Condutores.....	25
Equação 5 – Raio Médio Geometrico para 4 Condutores.....	25
Equação 6 – Valor das Fases do Sistema Simétrico Equilibrado .....	25
Equação 7 – Sequência Positiva de Fases .....	25
Equação 8 – Sequência Negativa de Fases.....	26
Equação 9 – Lei de Ampere Aplicada a um Condutor Infinito .....	33
Equação 10 – Campo Magnético Total.....	35
Equação 11 – Cálculo da Profundidade Complexa ‘p’ .....	35
Equação 12 – Relação de Campo Magnético com Densidade de Fluxo Magnético .....	36
Equação 13 – Cálculo do Campo Magnético Total em um Ponto 'P' .....	37
Equação 14 – Cálculo do Somatório do Campo Magnético Trifásico.....	37
Equação 15 – Cálculo Máximo Total de Campo Magnético .....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura Organizacional e os Agentes do Setor Elétrico Brasileiro .....	16
Figura 2 – Características Geométricas e Elétricas do Sistema 1 (138 kV).....	20
Figura 3 – Características Geométricas e Elétricas do Sistema 2 (345 kV).....	21
Figura 4 – Características Geométricas e Elétricas do Sistema 3 (500 kV).....	21
Figura 5 – Características Geométricas e Elétricas do Sistema 4 (500 kV).....	22
Figura 6 – Características Geométricas e Elétricas do Sistema 5 (138 kV).....	22
Figura 7 – Características Geométricas e Elétricas do Sistema 6 (765 kV).....	23
Figura 8 – Altura Média dos Condutores .....	24
Figura 9 – Cabos com Condutores Múltiplos.....	25
Figura 10 – Comparativo de Valores de Campo Magnético .....	28
Figura 11 – Sistema Monofásico Generalizado .....	34
Figura 12 – Método das Imagens para Sistema Monofásico.....	34
Figura 13 – Método das Imagens Aplicado ao Sistema Trifásico .....	35
Figura 14 – Método das Imagens aplicado ao sistema trifásico .....	36
Figura 15 – Configurações geométricas da linha de transmissão.....	39
Figura 16 – Modelo da torre de transmissão usado por German.....	39
Figura 17 – Gráfico do perfil do campo magnético segundo German.....	40
Figura 18 – Gráfico do perfil dos campos magnético segundo German.....	40
Figura 19 – Gráfico do Sistema 1 .....	42
Figura 20 – Gráfico do Sistema 2 .....	43
Figura 21 – Gráfico do Sistema 3 .....	44
Figura 22 – Gráfico do Sistema 4.....	46
Figura 23 – Gráfico do Sistema 5 .....	46
Figura 24 – Gráfico do Sistema 6.....	47
Figura 25 – Gráfico de Todos os sistemas .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Maiores Agentes de Capacidade Instalada no Brasil.....	17
Tabela 02 – Capacidade de Geração de Energia por Estado .....	18
Tabela 03 – Valores Limites de Camo Magnético, Densidades de Correntes e .....	
Correntes Induzidas para Publico Geral.....	30
Tabela 04 – Valores Limites de Camo Magnético, Densidades de Correntes e.....	
Correntes Induzidas para Exposição Ocupacional.....	30
Tabela 05 – Informações Numéricas Referente ao Campo Magnético do Sistema 1.....	41
Tabela 06 – Informações Numéricas Referente ao Campo Magnético do Sistema 2.....	42
Tabela 07 – Informações Numéricas Referente ao Campo Magnético do Sistema 3.....	44
Tabela 08 – Informações Numéricas Referente ao Campo Magnético do Sistema 4.....	44
Tabela 09 – Informações Numéricas Referente ao Campo Magnético do Sistema 5.....	46
Tabela 10 – Informações Numéricas Referente ao Campo Magnético do Sistema 6.....	47
Tabela 11 – Informações Numéricas Referente ao Campo Magnético de Todos.....	
Sistemas.....	48
Tabela 12 – Informações numéricas referentes ao campo magnético de todos os sistemas .....	49

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 APRESENTAÇÃO DO TEMA SOB DISCUSSÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Linhas de transmissão.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Observações geométricas e características elétricas do sistema .....</b>	<b>23</b>
<b>3 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS À EXPOSIÇÃO HUMANA AO.....</b>	<b>27</b>
<b>CAMPO MAGNÉTICO .....</b>	<b>27</b>
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1 Campo magnético das linhas de transmissão .....</b>	<b>32</b>
4.1.1 Lei de Ampere.....	33
4.1.2 Método das imagens.....	34
4.1.3 Modelagem do efeito do solo: métodos das imagens complexas de A. Deri .....	35
4.1.4 Equações para cálculo do campo magnético .....	36
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1 Validação da modelagem computacional .....</b>	<b>38</b>
<b>5.2 Análise do campo magnético em relação à configuração geométrica da.....</b>	<b>42</b>
<b>linha de transmissão.....</b>	<b>42</b>
<b>5.3 Todos os sistemas .....</b>	<b>48</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Para que a energia elétrica chegue em seu destino final, são necessárias várias etapas até que a mesma seja entregue aos grandes centros consumidores. A necessidade de transmiti-la, transportá-la de um lugar para outro permanece um desafio para a engenharia.

O sistema de energia elétrica brasileiro é composto pela geração, transformação, transmissão e distribuição. Para que isso ocorra, há a necessidade de transportar essa energia, sendo assim, tem-se a etapa denominada de transmissão, que estabelece a maior relação em extensão entre a geração e os centros consumidores que são ligadas por torres denominadas torres de transmissão (ROBBA, 1972).

Para uma avaliação criteriosa o presente trabalho analisa a interferência eletromagnética da linha de transmissão operando em regime permanente, ou seja: frequência de 60 Hz em função da geometria da mesma. Pode-se decompor a interferência eletromagnética em acoplamentos elétrico e magnético. Pela baixa frequência de operação da linha podem ser analisados e calculados de forma independente.

A modelagem matemática contemplada neste trabalho inclui a lei de Ampere, métodos das imagens, e modelagem do efeito do solo por meio do modelamento do mesmo via plano complexo (DERI, 1981) para o cálculo do campo magnético máximo total.

Notadamente também é visto uma grande variedade de perfis de linhas de transmissão, fator esse que pode ser analisado no que tange o campo magnético e seu valor em função da configuração geométrica das torres da linha de transmissão na faixa de segurança. Para isso é importante analisar inicialmente, alguns critérios, como também os efeitos da exposição dos seres humanos a campos magnéticos e suas consequências, e também uma exposição das normas regulamentadoras inerentes ao assunto.

A necessidade da elevação da tensão nas linhas de transmissão existe por motivos físicos e econômicos, acarretando em níveis elevados de correntes elétricas, o que, por conseguinte eleva os níveis de interferência eletromagnética em suas proximidades. Tais níveis magnéticos podem ser nocivos a estruturas e seres vivos que estejam posicionados na faixa de passagem das linhas de transmissão (NWGR, 1998; MORGAN, 1985; MORENO, 2003). Tal exposição torna-se necessária a delimitação, em ambos os lados de uma linha de transmissão, uma distância de segurança visto a exposição a campos magnéticos onde tais delimitações são denominadas faixas de passagem e/ou faixa de servidão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985; COMPANHIA PAULISTA FORÇA E LUZ, 2007).

O constante aumento de empresas e a demanda de energia no Brasil acarreta a necessidade de construção de linhas de transmissão menores, próximas aos grandes centros urbanos, episódio que leva a presença de estruturas existentes que ficam dentro da faixa de passagem da linha de transmissão. Isso ocorre pelo fato da carência de rotas adequadas e uma necessidade de redução de custos de implantação. Com a ampliação da demanda dos grandes centros urbanos, verifica-se a implantação de subestações próximas às áreas urbanas, o que motiva e torna cada vez mais importante o estudo das interferências eletromagnéticas originadas pelas linhas de transmissão (GONÇALVES, 2008).

Esta situação requer que sejam feitos estudos que avaliem os níveis de interferência magnética que as linhas de transmissão exercem sobre sua faixa de passagem. Essa interferência magnética poderá provocar danos, ou mesmo acidentes quando estruturas metálicas, por exemplo, estiver dentro da margem de segurança. A necessidade de estudo se justifica por algumas razões, como: seres humanos ou animais que estejam em contato direto com alguma estrutura metálica exposta a tensões induzidas correr o risco de um choque elétrico e/ou equipamentos que estejam conectados as estruturas metálicas submetidas a tensões induzidas elevadas dentro da faixa de passagem, em relação ao solo, podem ser danificados.

Para uma avaliação criteriosa pode-se analisar a interferência magnética de duas maneiras, com a linha de transmissão operando em regime permanente ou em regime transitório: Linha de transmissão operando em regime permanente senoidal (frequência de 60 Hz). Pode-se decompor a interferência eletromagnética em acoplamentos elétrico (capacitivo e condutivo) e magnético (indutivo). Pela baixa frequência de operação da linha os acoplamentos podem ser analisados e calculados de forma independente (SANTOS, 2011).

Para uma linha de transmissão operando em regime transitório, (situações de curto circuito, operações de chaveamento, incidência de descargas atmosféricas, dentre outros) a faixa de frequências é elevada, variando de 100 Hz a 1 MHz (LÚCIO, 2012). Neste caso, os efeitos da interferência eletromagnética devem ser avaliados na faixa de frequências superior do espectro o que impede de ser calculados de forma independente (SANTOS, 2011).

Em regime transitório o presente trabalho analisa a linha de transmissão, uma vez conhecido pelos altos valores de correntes e sobretensões que surgem na linha de transmissão quando um evento transitório a afeta. Porém, eventos transitórios como o citado, além de possuírem um tempo de ocorrência relativamente reduzido, não ocorrem na linha de transmissão de forma contínua. Por este motivo, neste trabalho faz-se a opção pelas análises das interferências magnéticas somente em regime permanente, pois as mesmas impõem

tensões induzidas de forma contínua. Contudo, a análise do campo magnético de uma linha de transmissão operando em regime permanente está inteiramente encontrada em (SANTOS, 2011). Um campo magnético tem sua fonte na variação temporal das correntes dos condutores nas linhas de transmissão, às quais podem, também, sofrer variações durante o período em análise em consequência da demanda variável ao longo do dia. No presente trabalho utiliza um valor específico máximo de corrente para garantir que os valores avaliados possam ser utilizados na análise de implantação e operação de uma linha de transmissão comparando-os a valores de referência recomendados segundo as normas em vigência (GUIMARÃES, 2005).

Este trabalho analisa e calcula a interferência magnética entre as linhas de transmissão analisando em regime permanente de acordo com as configurações geométricas de suas estruturas de sustentação. Espera-se com este trabalho verificar os resultados para concluir que a geometria da linha de transmissão influencia e afeta o comportamento do campo magnético na sua faixa de segurança. Por fim, a modelagem será feita através das equações de Ampere, Maxwell, método das imagens e efeito do solo por meio do modelamento do mesmo via plano complexo de Deri (1981).

Posteriormente aplica-se tal modelagem a um script no Matlab® possibilitando o cálculo dos níveis de campo magnético próximo às linhas de transmissão. Também os fatores de segurança de seres vivos são avaliados, caso os valores dos níveis de interferência ultrapassem os limites impostos pelas legislações em vigência.



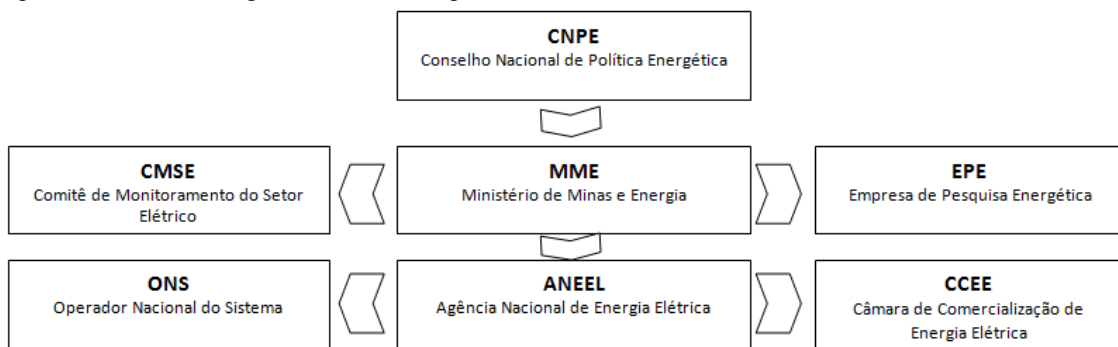
## 2 APRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS SOB ESTUDO

A quantidade de potência a ser transmitida é que diferencia os níveis de tensão na linha de transmissão de energia elétrica pelo território brasileiro, levando em consideração os parâmetros físicos e econômicos para a construção de linhas de transmissão (ROBBA, 1972).

È indispensável para o sistema elétrico de potência a integração dos sistemas regionais e nacionais, pois permite um intercâmbio de energia entre diversos sistemas de acordo com a necessidade de cada um, permitindo a construção de centrais mais eficientes, um aumento da reserva global de energia e maior confiabilidade do sistema perante situações de distúrbios (FUCHS, 1977).

O setor elétrico mundial é dividido em quatro segmentos bem definidos, sendo a geração, transmissão/transformação, distribuição e comercialização. A reestruturação do setor elétrico no Brasil aconteceu na desestatização das empresas do setor elétrico brasileiro e consequente abertura de capital do mercado de energia elétrica brasileiro (CAMARGO, 2005). Este modelo reestruturado do Brasil é regulamentado e gerenciado por novas instituições e por instituições já existentes com funções alteradas. A Figura 01 a seguir mostra a hierarquia entre esses órgãos, os quais têm como função principal o gerenciamento do setor elétrico brasileiro, garantindo a confiabilidade e segurança da geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2013).

Figura 01 - Estrutura organizacional e os agentes do setor elétrico brasileiro.



Fonte: (ANEEL, 2013).

O Brasil possui um sistema de energia elétrica com uma capacidade total de geração de aproximadamente 124334 MW de potência (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2013). A Tabela a seguir fornece os sete maiores agentes no que se refere à potência instalada no Brasil.

Tabela 01 - Maiores agentes de capacidade instalada no Brasil.

Nº	Agentes do Setor	Potência Instalada (kW)
1	Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF	10.618.327
2	Furnas Centrais Elétricas S/A – FURNAS	9.456.900
3	<b>Centrais Elétricas do Norte de Brasil S/A - ELETRONORT</b>	<b>9.256.933</b>
4	Companhia Energética de São Paulo – CESP	7.455.300
5	<b>Itaipu Binacional – ITAIPU (Brasil)</b>	<b>7.000.000</b>
6	Tractebel Energia S/A – TRACTEBEL	6.965.350
7	<b>Cemig Geração e Transmissão S/A – CEMIG</b>	<b>6.782.124</b>

Fonte: (ANEEL, 2013).

A repartição de energia do Brasil é composta por linhas de transmissão e distribuição que possibilitam a interligação dos centros de geração e consumo, que cobrem, segundo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017), aproximadamente 98% do território nacional. Ao sair das centrais geradoras, a eletricidade começa a ser transportada através de cabos aéreos, revestidos por camadas isolantes e fixados. As redes de transmissão de alta tensão em estudo são circuitos elétricos trifásicos (três fios/três fases) com tensões de 138 kV a 765 kV, sendo esse modelo, o que compõe cerca de 950 linhas de transmissão de energia do Brasil, as quais somam aproximadamente 100000 km com tensão igual ou superior a 230 kV (ABRATE, 2016). Estas estruturas além de serem responsáveis pelo transporte da energia elétrica, também exerce tal função, que é minimizar o campo magnético criado ao ambiente influenciado em uma margem chamada faixa de passagem oriunda da alta circulação de corrente elétrica nos cabos da linha de transmissão.

Por intermédio de suas controladas e coligadas de transmissão de energia elétrica, a CEMIG opera uma rede de transmissão de 7506 km, fato que a leva ser o terceiro maior grupo de transmissão de energia do Brasil, desenvolvendo atividades abrangendo a geração, transmissão e 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). Minas Gerais possui aproximadamente 5320 km de linhas de transmissão, o que corresponde a cerca de 5% do total nacional. O estado de Minas Gerais possui uma capacidade de geração de energia elétrica de aproximadamente 20.009 MW de potência, o que representa 16,1% da capacidade instalada no País, como mostrado na Tabela 2 a seguir o percentual em relação a cada estado (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2013).

Tabela 02 - Capacidade de geração de energia por estado.

UF	Capacidade Instalada (kW)	%
<b>DF</b>	<b>16.178</b>	<b>0,01</b>
<b>RR</b>	122.610,40	0,1
<b>AC</b>	<b>189.691,30</b>	<b>0,15</b>
<b>AP</b>	297.949	0,24
<b>PI</b>	<b>316.944</b>	<b>0,25</b>
<b>PB</b>	641.470	0,52
<b>RN</b>	902.251	0,73
<b>ES</b>	1.872.815	1,51
<b>RO</b>	<b>1.930.748,48</b>	<b>1,55</b>
<b>CE</b>	2.186.828	1,76
<b>AM</b>	<b>2.262.854</b>	<b>1,82</b>
<b>MT</b>	2.784.328,82	2,24
<b>MA</b>	<b>2.802.595,27</b>	<b>2,25</b>
<b>TO</b>	2.908.080	2,34
<b>PE</b>	<b>3.190.833,70</b>	<b>2,57</b>
<b>SE</b>	3.281.999,40	2,64
<b>SC</b>	<b>7.211.577,80</b>	<b>5,8</b>
<b>AL</b>	7.748.086,50	6,23
<b>MS</b>	<b>8.518.892</b>	<b>6,85</b>
<b>RJ</b>	8.822.487,40	7,1
<b>PA</b>	<b>9.054.729,60</b>	<b>7,28</b>
<b>RS</b>	9.121.002,70	7,34
<b>BA</b>	<b>9.883.307,30</b>	<b>7,95</b>
<b>GO</b>	10.572.043,20	8,5
<b>PR</b>	<b>18.163.208,46</b>	<b>14,61</b>
<b>MG</b>	20.009.842,54	16,1
<b>SP</b>	<b>24.983.678,52</b>	<b>20,1</b>

Fonte: (ANEEL, 2013).

## 2.1 Linhas de transmissão

Nas linhas de transmissão aérea de energia elétrica tem-se uma separação que caracteriza as partes ativas e passivas. Entende-se como parte ativa de uma linha de transmissão aérea os cabos condutores, que são os responsáveis pelo transporte da energia elétrica. Já a parte passiva de uma linha de transmissão aérea é composta pelos isoladores, ferragens e estruturas, as quais garantem o afastamento dos condutores do solo e entre si, e devem resistir tanto às solicitações mecânicas quanto às elétricas. Para-raios e aterramentos também fazem parte das características físicas de uma linha de transmissão aérea (FUCHS, 1977; ELETRIC POWER RESARCH INSTITUTE, 1987).

Outros fatores também são analisados e levados em consideração na escolha da forma geométrica de uma torre de uma linha de transmissão aérea, sendo os mais relevantes: a tensão de operação, número de circuitos, cadeias de isoladores, cabos para-raios, diâmetros dos condutores ou feixes de condutores, ferragens, forma de resistir, dentre outros fatores,

escolher por aquela que apresenta o menor impacto ao meio ambiente adequando aos aspectos de segurança relativos aos níveis de campos eletromagnéticos gerados (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1987; NETO, 2007).

Em uma das primeiras etapas para o projeto de uma linha de transmissão aérea, é feito o levantamento do traçado, o perfil do terreno e solo, cadastro de propriedades, reservas ambientais, obstáculos no percurso, dentre outros devem ser analisados, pois são de fundamental importância (GUIMARÃES, 2005). Tal estudo se faz visando a necessidade de garantir que o sistema seja viável financeiramente e fisicamente, confiável e seguro tanto para os seres vivos quanto para as estruturas próximas (PIRES, 2005). Também nessa etapa do projeto de uma linha de transmissão aérea, é de grande relevância a demarcação da faixa de passagem da mesma, que é a faixa de terra, ao longo de sua extensão transversal, onde fica definitivamente proibida a construção de quaisquer estruturas. A regulamentação de uma faixa de passagem faz-se necessária a fim de garantir um bom desempenho da linha de transmissão e principalmente à segurança dos seres vivos e estruturas (COMPANHIA PAULISTA FORÇA E LUZ, 2007).

As configurações das linhas de transmissão como suas características físicas e algumas características elétricas utilizadas neste trabalho, são descritas a fim de melhorar o entendimento do mesmo. Diante da grande demanda, a Cemig tem total importância no Brasil e em Minas Gerais para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo utilizado neste trabalho configurações de linhas de transmissão reais da concessionária para o desenvolvimento dos estudos.

O desempenho de uma linha de transmissão aérea tem uma dependência muito grande em função de suas características físicas. Tais características determinam o seu comportamento em regime normal de operação, definindo assim, os seus parâmetros elétricos como: os cabos condutores ideais para linhas aéreas de transmissão que devem apresentar as seguintes características como a alta condutividade elétrica, baixo custo, boa resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência à oxidação e à corrosão por agentes químicos poluentes (FUCHS, 1977; EPRI, 1987). Porém nenhum material é capaz de atender a todas essas características simultaneamente, sendo o mais utilizado em linhas de transmissão o alumínio e suas ligas (FUCHS, 1977). As dimensões e formas das torres dependem de diversos fatores como: o número de circuitos (um ou dois circuitos), disposição dos condutores (triangular, vertical ou horizontal), função da cadeia de isolador (suspensão, ancoragem e ângulo), formato (tronco piramidal de circuito simples e duplo, delta e estaiada), resistência mecânica das estruturas e tensão da linha principalmente (SANTOS, 2011;

FUCHS, 1977). Adicionalmente, a linha deve se adequar aos aspectos de segurança relativos aos níveis de campos eletromagnéticos gerados, rádio interferência e nível de ruído (EPRI, 1987; NETO, 2007).

De acordo com CPFL (2007), nos casos mais comuns, linhas de transmissão de 69 a 138 kV possuem uma faixa de passagem de 30 metros (15 metros para cada lado). Para linhas de transmissão com tensões de 34,5 kV, a faixa de passagem mínima é de 20 metros (10 metros para cada lado). Para linhas de transmissão com tensões acima de 138 kV a faixa de servidão depende do tipo da torre a ser instalada como será apresentada aqui. Partindo destas informações, ao projetar uma linha de transmissão, estes aspectos devem ser considerados (COMPANHIA PAULISTA FORÇA E LUZ, 2007): minimizar a quantidade de torres; determinar espaçamento uniforme entre as torres; evitar torres em terrenos acidentados, úmido ou com erosão; garantir uma distância mínima dos cabos condutores em relação ao solo; evitar o paralelismo entre a linha de transmissão e linhas férreas, cercas de arame e outras estruturas metálicas.

Neste trabalho são empregados seis modelos de linhas de transmissão, que representam configurações geométricas reais de algumas linhas de transmissão do território de Minas Gerais utilizadas pela Cemig e Furnas, cujos detalhes são ilustrados a seguir com a intenção de explicitar a influência da configuração geométrica da linha de transmissão em determinadas análises de sensibilidade utilizando configurações reais, cujas descrições detalhadas são apresentadas por meio de figuras da silhueta da torre junto à tabela contendo informações de configurações elétrica e geométrica.

Figura 02 - Apresenta as características geométricas e elétricas do Sistema 1 - Linha de Transmissão de 138 kV.

Configurações Geométricas e Elétricas do Sistema 1		
Tensão de Operação	138 kV	
Altura média da fase A	12,15 m	
Altura média da fase B	14,01 m	
Altura média da fase C	15,87 m	
Vão médio	400 m	
Espaçamento entre as fases (referência fase PR)	3,00 m	

Fonte: (SANTOS, 2011).



A Figura 04 concebe o terceiro sistema que será utilizado neste trabalho para a obtenção de valores através da plotagem de um gráfico representativo. Tal sistema apresenta uma torre de característica de base estaiada em formato de ‘V’, é simétrico devido a posição das fases estarem a mesma distância do solo (16,53 m) e entre si (10,25 m), como visualizado na Figura 04, e tem características como circuito simples e tensão de operação de 500000 volts.

Figura 05 - Apresenta as características geométricas e elétricas do Sistema 4 Linha de Transmissão de 500 kV.

Configurações Geométricas e Elétricas do Sistema 4		
Tensão de Operação	500 kV	
Altura média da fase A	17,50 m	
Altura média da fase B	25,00 m	
Altura média da fase C	17,50 m	
Vão médio	450 m	
Espaçamento entre as fases (referência fase B)	7,50 m	

Fonte: (SANTOS, 2011).

A Figura 05 expõe o quarto sistema que será utilizado neste trabalho para a obtenção de valores através da plotagem de um gráfico representativo. Tal sistema apresenta uma torre de característica estaiada com um único ponto de base fixada, é denominado delta devido a posição das fases estarem em formato de um triângulo, sendo a fase ‘B’ situada a 25 metros do solo enquanto as fases ‘A’ e ‘C’ estarem dispostas a 17,5 metros caracterizando assim sua nomenclatura como visualizado na Figura 05, circuito simples e 500000 volts.

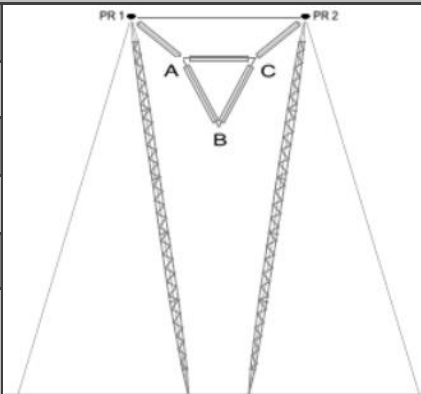
Figura 06 - Apresenta as características geométricas e elétricas do Sistema 5 - Linha de Transmissão de 138 kV.

Configurações Geométricas e Elétricas do Sistema 5		
Tensão de Operação	138 kV	
Altura média da fase A, A'	22,40 m	
Altura média da fase B, B'	18,72 m	
Altura média da fase C, C'	15,00 m	
Vão médio	450 m	
Espaçamento entre as fases (A-A', B-B' e C-C')	15,00 m	

Fonte: (SANTOS, 2011).

A Figura 06 exibe o quinto sistema que será utilizado neste trabalho para a obtenção de valores através da plotagem de um gráfico representativo. Tal sistema apresenta uma torre de característica também auto portante de base piramidal, é denominado duplo devido aos dois circuitos paralelos expostos na Figura sendo a posição das fases ‘A’, ‘B’ e ‘C’ 22,4 metros, 18,72 metros e 15 metros respectivamente, caracterizando assim sua nomenclatura como visualizado na Figura 06, sendo o circuito simples e tensão de operação de 138000 volts.

Figura 07 - Apresenta as características geométricas e elétricas do Sistema 6 - Linha de Transmissão de 765 kV.

Configurações Geométricas e Elétricas do Sistema 6		
Tensão de Operação	765 kV	
Altura média da fase A	29,00 m	
Altura média da fase B	17,00 m	
Altura média da fase C	29,00 m	
Vão médio	390 m	
Espaçamento entre as fases (referência fase B)	7,00 m	

Fonte: (HOLDINGS LTDA, 2006).

A Figura 07 apresenta o sexto e ultimo sistema que será utilizado neste trabalho para a obtenção de valores através da plotagem de um gráfico representativo. Tal sistema apresenta uma torre de característica de base estaiada em formato de ‘V’, é denominado delta invertido devido a posição das fases estarem em formato de um triângulo inverso, sendo a fase ‘B’ situada a 17 metros do solo enquanto as fases ‘A’ e ‘C’ estarem dispostas a 29 metros caracterizando assim sua nomenclatura como visualizado na Figura 07, sendo um circuito simples e tensão de operação de 765000 volts.

## 2.2 Observações geométricas e características elétricas do sistema

As seguintes observações, relacionadas às configurações geométricas e características elétricas dos Sistemas, são importantes:

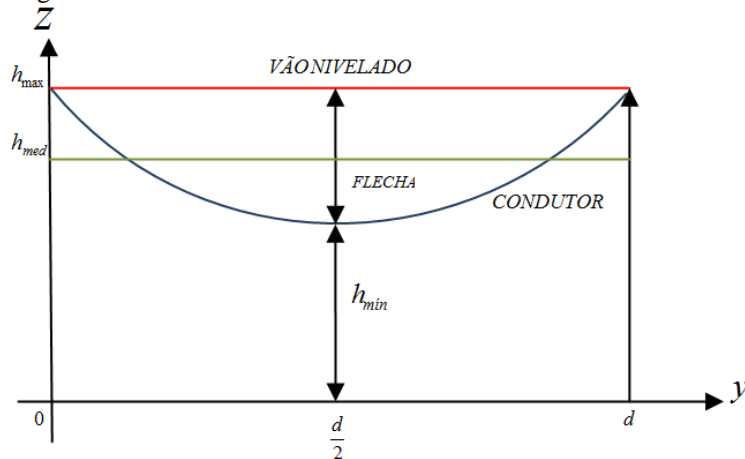
A altura média dos condutores de uma linha de transmissão em relação ao solo que é calculada pela Equação 1 a seguir.

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



onde ( $h_{m\acute{a}x}$ ) é a altura máxima do condutor na torre, e ( $F$ ) é a flecha (SANTOS, 2011; FUCHS, 1977; CAVASSINI, 2011). Verifica-se que a altura média dos condutores da linha de transmissão em relação ao solo considera o cálculo da flecha, a qual se refere à distância ortogonal do ponto mínimo da catenária ao vão nivelado (SANTOS, 2011; FUCHS, 1977; CAVASSINI, 2011). A Figura 08 mostra a representação dos parâmetros citados anteriormente.

Figura 08 - Altura média dos condutores.



Fonte: o autor.

Empregar a equação 2, para calcular o valor da flecha ( $F$ ), trará resultados reais da catenária (CAVASSINI, 2011):

$$F = \frac{pA_e^2}{8T_0} \quad (2)$$

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, em kgf.

Quando as linhas de transmissão possuírem múltiplos subcondutores, dispostos em feixe, utiliza-se como base o método do Raio Médio Geométrico (RMG) para cálculo do raio equivalente desse condutor, onde fica determinado que o condutor equivalente ao feixe está a uma altura igual ao centro da circunferência do feixe. Para cabos com dois, três e quatro subcondutores o RMG é dado pelas Equações a seguir respectivamente (STEVENSON, 1974).

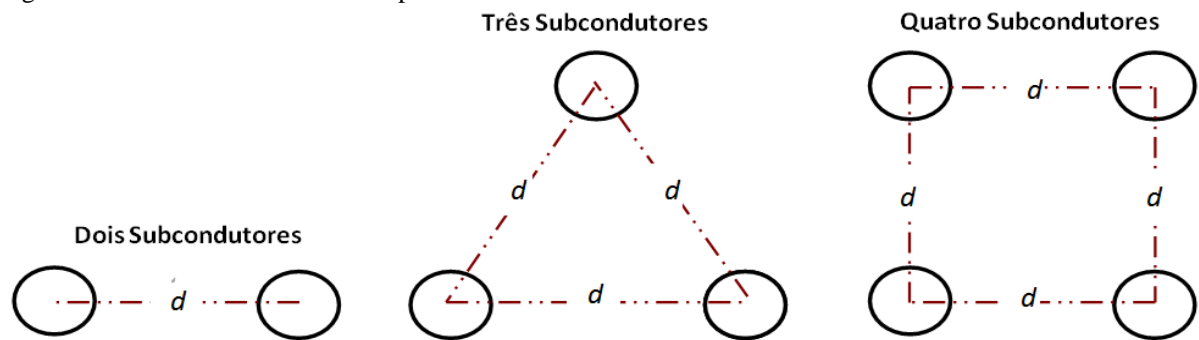
$$\text{RMG} = \sqrt{D \cdot d} \quad (3)$$

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

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

onde RMG é o raio do condutor equivalente,  $D_s$  é o raio dos condutores individuais corrigido pelo efeito pelicular, o qual é fornecido por meio de Tabelas de acordo com o tipo do cabo, referência (STEVENSON, 1974) e  $d$  é a distância entre os subcondutores. A Figura 09 mostra a disposição de cabos múltiplos para dois, três e quatro subcondutores.

Figura 09 - Cabo com condutor múltiplo.



Fonte: o autor.

Para o cálculo dos valores das fases que estão dispostas em sequência positiva de fase ABC utiliza-se a equação desde que consideramos o sistema sob estudo simétrico e equilibrado. Assim, inicialmente calcula-se a corrente  $I$  (ROBBA, 1972; FUCHS, 1977; EPRI, 1987; STEVENSON, 1974), segundo a Equação 6.

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

onde ( $S_{3\phi}$ ) é potência trifásica (potência aparente) e ( $V$ ) é a tensão fase-fase da linha de transmissão. Por fim, é feito o defasamento das correntes nas fases A, B e C (ROBBA, 1972; STEVENSON, 1974), como representado na Equação 7.

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

Quando a sequência de fase for CBA (ROBBA, 1972; STEVENSON, 1974), o resultado final do defasamento das fases é representado pela Equação 8.

$$\begin{aligned}
 I_A &= I \angle 0^\circ \\
 I_B &= I \angle 120^\circ \\
 I_C &= I \angle -120^\circ
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

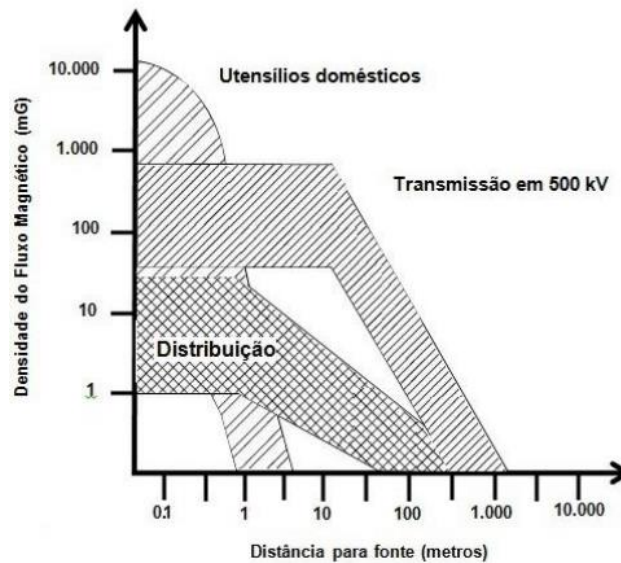
### 3 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA EXPOSIÇÃO HUMANA AO CAMPO MAGNÉTICO

A construção de linhas de transmissão que operem em níveis de tensão altamente elevados traz uma solução tecnicamente viável para atender a essa nova demanda de consumo, o que reduz as perdas ôhmicas e possibilita aumentar o fluxo de potência ativa nas linhas. Tendendo atender ao consumo cada vez maior exigido de energia elétrica com ampliações dos sistemas de transmissão e distribuição, como também a presença de novas subestações necessárias pelas grandes cidades. Tais fatores motivam a comunidade científica a analisar os efeitos dos campos elétrico e magnético que essas novas interações causam na saúde dos seres vivos expostos aos mesmos.

No intuito de analisar e verificar a relação entre campos elétricos e campos magnéticos e os possíveis efeitos causados na saúde das pessoas expostas aos mesmos, vários estudos vêm sendo elaborados nas últimas três décadas (HAVAS, 2004; MORENO, 2005; KOIFMAN, 2003). Nesta parte se busca mostrar as normas, análises e efeitos do campo magnético incidente sobre os seres vivos. A avaliação dos níveis de campo magnético que incidem sobre os seres vivos, no caso especial das pessoas, é bem caracterizada por meio da utilização de instrumentos convencionais de medição. Tal medição é realizada através de um aparelho chamado “dosímetro” que fica fixado ao corpo das pessoas, para coletar e mensurar o nível do campo magnético a que a mesma está exposta diariamente, devido a várias fontes de campos magnéticos. Sabendo que os valores do campo magnético são fornecidos em mili Gauss (mG), como na Figura 10, e a conversão para microTesla ( $\mu\text{T}$ ) é feita sabendo-se que  $1 \mu\text{T}$  equivale a 10 mG.

A Figura 10 mostra os valores do campo magnético gerado por utensílios domésticos, linhas de transmissão de 500 kV e linhas de distribuição, variando de acordo com a distância dos mesmos.

Figura 10 - Comparativo de valores de campo magnético.



Fonte: (SILVA, 2009).

O efeito dos campos elétrico e magnético em seres vivos vem sendo alvo de estudos ao longo do tempo trouxeram várias conclusões e perspectivas importantes. Alguns estudos realizados por (IEEE, 1994; HAFEMEISTER, 1996; ICNIRP, 2001) colaboram para as seguintes conclusões despontando que em seres vivos que são expostos a campos elétricos e magnéticos na frequência industrial de 60 Hz há o surgimento de correntes induzidas internas nos mesmos. A particularidade dessa corrente induzida é a sua não uniformidade quando percorre o corpo do ser vivo em questão. Distribuições de corrente induzida dos campos elétrico e magnético são diferentes. Residências, ambientes a 60 Hz, e em locais de trabalho os níveis de campo magnético são da ordem de 0,3 a 10000 mG. Elevados níveis de campo magnético se localizam abaixo de linhas de transmissão e em determinados locais de trabalho. Abaixo da linha de transmissão entende-se como verticalmente sob os cabos fase da linha de transmissão e como locais de trabalho podem-se citar, por exemplo, subestações de energia elétrica e cabines de alta tensão. Seres humanos quando expostos a um campo magnético de 0,1 mG são submetidos a uma densidade de corrente induzida de valor máximo  $1 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . O corpo humano por natureza, devido a atividade elétrica de células nervosas, apresenta uma densidade de corrente endógena de valor aproximado de  $1 \text{mA}/\text{m}^2$ . Percebe-se que os valores de densidade de corrente induzidas por agentes externos são 1000 vezes menores do que a densidade de corrente que ocorre naturalmente no corpo humano.

Alguns documentos teóricos ou experimentais sobre valores de densidade de corrente induzida em células e tecidos do corpo humano não são encontrados na literatura existente, os quais levam em consideração as propriedades elétricas do meio, tais como a condutividade e

permissividade. Cientificamente não foram verificadas evidências relevantes no que diz respeito ao surgimento do câncer em animais quando expostos a campos elétricos e magnéticos na frequência de 60 Hz.

Visando regulamentar a exposição humana a campos magnéticos, o estudo a respeito desses efeitos vem se expandindo intensamente para regulamentar os níveis máximos de exposição. Normas nacionais e internacionais regulamentam os valores de campo magnético, densidade de corrente e corrente induzida nos seres humanos e seus respectivos valores limites com valores de referência para campos magnéticos, ao qual um ser humano pode eventualmente se submeter, estabelecido pela Comissão Internacional para Proteção contra Radiações Não-Ionizantes (ICNIRP) os quais são reconhecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

Fatores preponderantes para estabelecer valores de referência de campos magnéticos dos efeitos biológicos causados em seres, são distinguidos pela exposição imediata aos campos magnéticos, dentre os quais são de relevância a estimulação de células nervosas do cérebro, nervos periféricos e músculos, incluindo o coração (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000). Quando submetido a campos magnéticos, o corpo humano está sujeito a densidades de correntes induzidas e, por não ser eletricamente homogêneo, é modelado por meio de métodos computacionais que têm grande resolução anatômica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000). Níveis de exposição humana aos efeitos dos campos magnéticos são elaborados com base em relações entre as grandezas físicas correspondentes e os efeitos biológicos que as mesmas causam. Segundo ABNT (2000), a grandeza física utilizada nesses casos é a densidade de corrente elétrica, a qual possui um valor de referência de  $100 \text{ mA/m}^2$  como limite para que excitações indesejáveis no sistema nervoso central comecem a aparecer.

É recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) que tais valores de referência estejam analisados em função de sua amostra instantânea, recomendação que se justifica pela escassez de dados que relacionam as correntes transitórias com efeitos na saúde. Segundo o ICNIRP (2001), ABNT (2000), NBR 15145 (2006) e IEEE-C95.6 (2002) para a frequência de 60 Hz utiliza-se a grandeza densidade de corrente para determinar os limites de exposição humana visto que, na faixa de frequência de 4 Hz a 1 kHz, quando seres humanos são expostos a um valor de densidade de corrente superior a  $100 \text{ mA/m}^2$  o sistema nervoso central é excitado indevidamente, além de outros efeitos indesejáveis. Sendo assim, a partir da determinação desse parâmetro, é estabelecido que, na faixa de frequência citada acima, deve ser adotado um fator de segurança de valor 10, ou seja, o limite de exposição ocupacional de

seres humanos deve ser limitado a uma densidade de corrente de valor não superior a 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>. Sendo que 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 (ICNIRP, 2001; ABNT, 2000; IEEE-C95.6, 2002). A Organização Mundial de Saúde (OMS) estabelece como normal um valor de 1 mA. As Tabelas a seguir 3 e 4 fornecem um resumo dos valores limites de exposição de seres humanos a campos magnéticos, para o público em geral e exposição ocupacional, respectivamente (ICNIRP, 2001; ABNT, 2000; NBR 15145, 2006; IEEE-C95.6, 2002).

Tabela 03 - Valores limite de campos magnético para o público geral.

Parâmetro/Órgão	Valores para Público Geral			
	ICNIRP	ABNT	NBR 15145	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
<b>Obs: 1<math>\mu\text{T}</math> = 10 mG</b>				

Fonte: (ICNIRP, 2001), (ABNT, 2000), (NBR 15145, 2006), (IEEE-C95.6, 2002).

Tabela 04 - Valores limite de campos magnético para exposição ocupacional.

Parâmetro/Órgão	Valores para Exposição Ocupacional			
	ICNIRP	ABNT	NBR 15145	IEEE C95.6
Densidade de Fluxo Magnético ( $\mu\text{T}$ )	416,6	416,6	-	2712
Densidade de Fluxo Magnético (mG)	4166	4166	-	27120
<b>Obs: 1<math>\mu\text{T}</math> = 10 mG</b>				

Fonte: (ICNIRP, 2001), (ABNT, 2000), (NBR 15145, 2006) e (IEEE-C95.6, 2002).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000), a diferença entre exposição para público geral (Tabela 03) e exposição ocupacional (Tabela 04), bem como o motivo da maior severidade dos valores para o público em geral, tais razões são dispostas para o público ocupacional por serem indivíduos adultos que estão expostos as condições de interferência magnética, conhecerem as mencionadas condições e assim, possuem treinamento técnico, ficando atentos ao potencial de risco, sendo capazes de tomar as necessárias precauções para minimizar os riscos a possíveis acidente. Contrapondo com o indivíduo de

exposição ocupacional, o público em geral é composto de pessoas de todas as idades e condições de saúde, o que implica na possível incidência de indivíduos particularmente incapazes por não terem treinamento para agregar a segurança do mesmo. Público em geral, em sua maioria não possui consciência dos efeitos de uma exposição a interferência eletromagnética, além de não possuir treinamento ou capacidade de tomar as devidas precauções que minimizem ou evitem esta exposição.

## 4 METODOLOGIA

Em modelagens envolvendo grandezas matemáticas e/ou física é imprescindível algumas aproximações. Tais aproximações devem ser detalhadamente conhecidas, pois envolvem os limites de validade de aplicação da modelagem proposta, que implica na coerência dos resultados apresentados de análises de sensibilidade, desenvolvimento e resultado final representativamente aproximado.

Para o cálculo de interferência magnética entre linhas de transmissão operando em regime permanente emprega uma modelagem com base nas equações de Maxwell (SADIKU, 2004), Lei Circuital de Ampère Generalizada ou Lei de Ampère-Maxwell, a Lei de Faraday, alguns teoremas e métodos adicionais (DERI, 1981; JUNIOR, 1974), raio médio geométrico, método das imagens complexas e teorema da superposição. As Equações de Maxwell descrevem o comportamento eletromagnético de um sistema elétrico na forma pontual (ou diferencial), integral, e no domínio do tempo. As formulações das Equações de Maxwell e também suas inúmeras aplicações são fortemente visualizadas na literatura da área (SADIKU, 2004).

As equações de Maxwell são empregadas ao estudo de forma simples por se tratar de um cálculo de campo magnético em regime permanente em 60 Hz. Assim, a equação que trata da natureza divergente do campo elétrico gerado por distribuições de cargas elétricas, não é utilizada, pois na faixa de frequências industriais (50 ou 60 Hz) o efeito deste campo pode ser desacoplado do efeito do campo magnético (SANTOS, 2011; SCHROEDER, 1996). Diante disto as equações serão consideradas para análises de campo magnético.

Sendo assim, alguns conceitos devem ser levados em consideração por se tratarem de ordens práticas. As correntes de distribuições que geram campo magnético correspondem às existentes nos condutores da linha (cabos fase). Para este evento, bons condutores em baixa frequência (alto valor de condutividade e permissividade igual à do vácuo), observando a relação entre a densidade de corrente de condução e a densidade de corrente de deslocamento (que corresponde à grandeza física denominada “tangentes de perdas”), sendo possível verificar que a corrente de deslocamento é, em termos práticos, desprezível.

### 4.1 Campo magnético entre linhas de transmissão

Neste trabalho são expostos cálculos de campo magnético a um metro do solo em conformidade com a exigência das normas. A modelagem do cálculo é feita de modo



sequencial onde são abordados separadamente e descritos cada etapa dos cálculos, com objetivo final de obtenção de equações fisicamente consistentes. Apresenta toda evolução do modo como são feitos os cálculos, premissas, limites de validade para determinação nas equações finais de cálculo bem como mostrar algumas modelagens já existentes na literatura. Tal modelagem eletromagnética é, primeiramente, vinculada às suas premissas que a validam no escopo deste trabalho. Em seguida, para o cálculo do campo magnético são calculados os valores dos campos vetoriais intensidade de campo magnético (H) e densidade de fluxo magnético (B), os quais também serão detalhados. Sendo assim, é organizada da seguinte forma sequencial: lei de Ampère para fenômenos quase estáticos; método das imagens; modelagem do solo mediante o método das imagens complexas Deri (1981) chegando às equações finais para o cálculo da intensidade de campo magnético total.

#### 4.1.1 Lei de Ampere

Utiliza-se a Lei de Ampère aplicada a um condutor infinito para determinação do campo magnético onde podemos aplicar tal lei para algumas distribuições simétricas de corrente para facilitar os cálculos, considerando  $\vec{H}$  gerado por uma linha infinita de corrente deduzindo-se tal lei a partir das equações: conforme pode ser visto na Equação 9.

$$I = \int_L \vec{H} \cdot dL \quad \rightarrow \quad I = \int_0^{2\pi} \vec{H}_{a\phi} \cdot \rho d\phi_{a\phi} \quad \rightarrow \quad I = H \int_0^{2\pi} \rho d\phi \quad \rightarrow \quad I = H\rho 2\pi$$

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi\rho} a_\phi \quad (9)$$

onde:

$\vec{a}_\phi$  : vetor unitário na direção do ponto de observação.

$\vec{a}_\phi = \vec{a}_1 \times \vec{a}_\rho$  permutação cíclica.

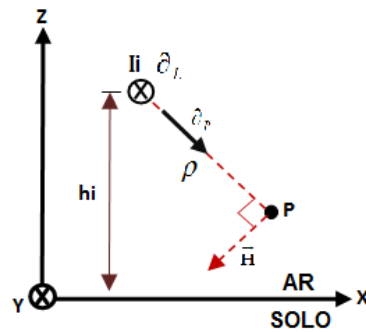
$\vec{a}_1$  : vetor unitário ao longo da linha de corrente.

$\vec{a}_\rho$  : vetor unitário perpendicularmente traçado a partir do elemento de corrente até o ponto de observação.

$\rho$  : raio do cilindro imaginário.

A Figura 11 a seguir aplica a Lei de Ampère a um sistema monofásico para fins de se determinar o campo magnético  $\vec{H}$  no ponto P.

Figura 11 - Sistema monofásico generalizado utilizado para cálculo do campo magnético.



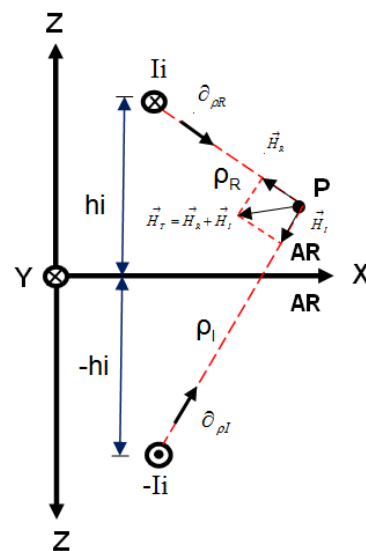
Fonte: o autor.

#### 4.1.2 Métodos das imagens

Consiste em um método equivalente reflexivo, estabelecendo que para uma dada configuração de corrente, próxima a um plano infinito, condutor perfeito aterrado, pode ser substituída pela própria configuração de corrente, por sua imagem e por uma superfície equipotencial no lugar do plano condutor.

A Figura 12 ilustra o resultado da aplicação do Método das Imagens no sistema esboçado na Figura 11.

Figura 12 - Método das Imagens para um sistema monofásico



Fonte: o autor.

Assim, o campo total fica de acordo com a Equação 10.

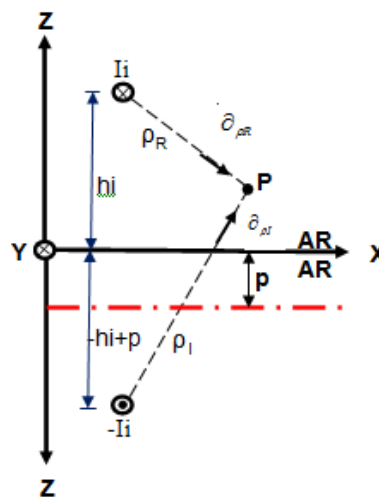
$$\vec{H}_T = \frac{I}{2\pi\rho_R} \hat{a}_{\phi_R} + \frac{I}{2\pi\rho_I} \hat{a}_{\phi_I} \quad (10)$$

A inclusão é realizada por meio do conceito de plano de retorno complexo Deri (1981).

#### 4.1.3 Modelagem do efeito do solo: método das imagens complexas de A. Deri (1981)

Partindo do pressuposto de que não temos um meio ideal, ou seja, temos dois meios semi-infinitos que são o ar e o solo, as correntes elétricas dos condutores de uma determinada linha de transmissão geram campos magnéticos cuja distribuição espacial penetra no mesmo como representa a Figura 13. Esse efeito deve ser incluído na modelagem magnética, utilizando do método das imagens complexas, desenvolvido por Deri (1981), o qual consiste na concepção de um plano complexo de condutividade infinita de retorno de corrente, situado abaixo do solo, a uma distância igual à profundidade de penetração complexa “p”.

Figura 13 - Método das Imagens Complexas de A. Deri aplicado ao sistema monofásico.



Fonte: o autor.

A Equação 11 é a formulação proposta por Deri (1981) para o cálculo da profundidade complexa “p”.

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_s}} \quad (11)$$

#### 4.1.4 Equações para cálculo do campo magnético

O campo magnético  $\vec{H}$  e a densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$ , gerados pelas correntes nos condutores de linhas de transmissão monofásicas e trifásicas, em regime permanente, podem ser expressos no domínio do tempo ou no domínio fasorial.

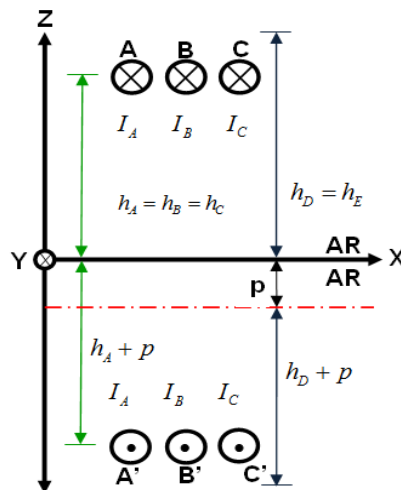
É aceitável determinar que a Equação 12 relacione diretamente  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$  da seguinte maneira:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (12)$$

onde  $(\mu_0)$  é a permeabilidade magnética do vácuo cujo valor é  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [\text{H/m}]$  e  $\vec{B}$  tem sua definição como sendo a força magnética por unidade de elemento de corrente.

Uma linha trifásica de configuração generalizada horizontal, com a influência do solo modelada pelo método das imagens complexas é tomada como base para a formulação geral de cálculo do campo magnético. As formulações apresentadas podem ser particularizadas para configurações específicas de determinadas linhas de transmissão.

Figura 14 - Método das Imagens aplicado ao sistema trifásico.



Fonte: o autor.

Para o cálculo do campo magnético total no ponto P apresentado na Figura 14 é aplicada a Lei de Ampère. Assim, cada condutor contribui com duas parcelas de campo magnético, como ilustrado na Equação 13.

$$\vec{H}_{T_i} = \frac{I_i}{2\pi\rho_{R_i}} \hat{a}_{\phi_{R_i}} + \frac{I_i}{2\pi\rho_{I_i}} \hat{a}_{\phi_{I_i}} \quad (13)$$

Por fim a Equação 14 representa a formulação do campo magnético para um determinado ponto de observação com altura.

$$\begin{aligned} \vec{H}_T = & \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi(\rho_{R_i})^2} (h_p - h_i, 0, x_i - x_p) \\ & + \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi(\rho_{I_i})^2} (-h_p - h_i - 2p, 0, x_p - x_i) \end{aligned} \quad (14)$$

A formulação final para o cálculo do campo leva em consideração apenas os módulos finais dos componentes x e z de  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$ .

Partindo dessa consideração determinam-se então os módulos dos componentes totais referentes aos eixos x e z, o que gera a Equação 15.

$$H_{TMAX} = \sqrt{\left(\sqrt{(H_{TRX})^2 + (H_{TIK})^2}\right)^2 + \left(\sqrt{(H_{TRZ})^2 + (H_{TIZ})^2}\right)^2} \quad (15)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

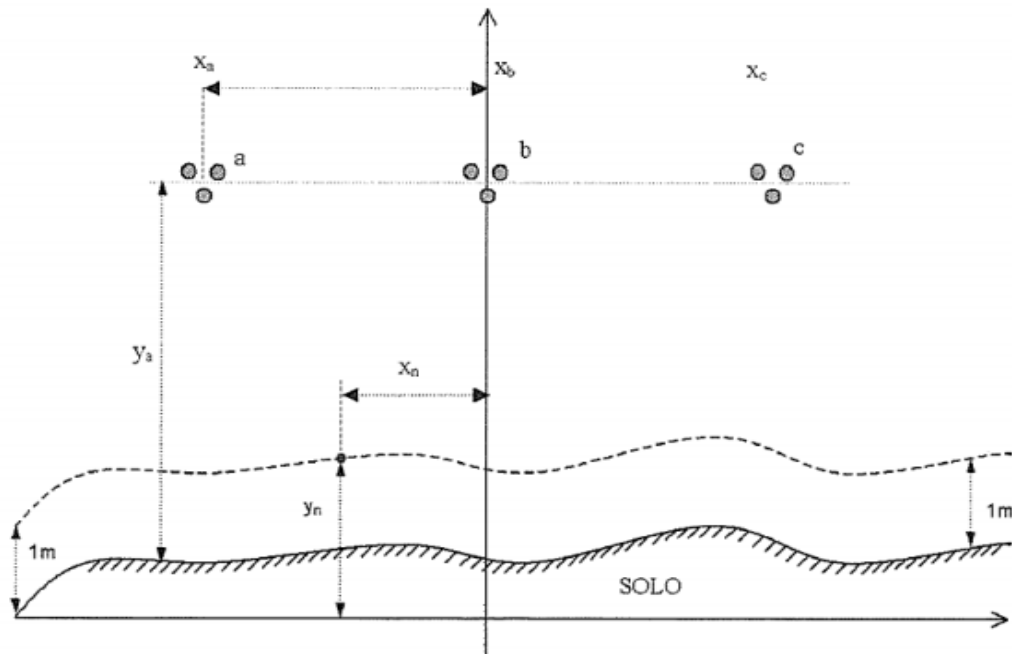
### 5.1 Validação da modelagem computacional

A necessidade de validar os resultados alcançados neste trabalho é de fundamental importância para a aprovação da confiabilidade computacional do script. Através de um programa desenvolvido em Matlab®, foram obtidas simulações que comprovam a linearidade dos cálculos bem como sua exatidão, calculando os níveis de campo magnético fundamentado na metodologia apresentada e baseado em uma referência de Guimarães (2005). Tal literatura diz respeito a uma linha de transmissão real de Minas Gerais de 500 kV operando em frequência de 60 Hz, sendo uma torre de transmissão horizontal, estilo auto portante, com circuito simples com corrente de operação de 650 A, onde os estudos realizados do campo magnético serão utilizados para a validação desse trabalho que leva em consideração uma corrente padrão de operação de 1000 A para todos modelos geométricos de torres apresentados.

Para a validação tem-se a necessidade de configurações na mesma escala da medição da literatura como também a comparação dos valores máximos e limites de posição do campo magnético abaixo do eixo de simetria apresentado na forma de gráficos e tabelas.

Tal linha de transmissão é composta por três subcondutores em cada fase, com diâmetro de 28,74 mm e espaçamento entre eles de 0,457 m. Sendo que a fase 'A' e fase 'C' estão a uma distância de 12 m da fase 'B' tida referência simétrica ao eixo da torre com o solo. O solo onde a torre está implantada é irregular e por isso têm-se alturas máximas e mínimas variando de 25,26 m a 10,86 metros do solo como mostrada nas Figuras a seguir 15 e 16.

Figura 15 - Configurações geométricas da linha de transmissão.



Fonte: (Guimarães, 2005).

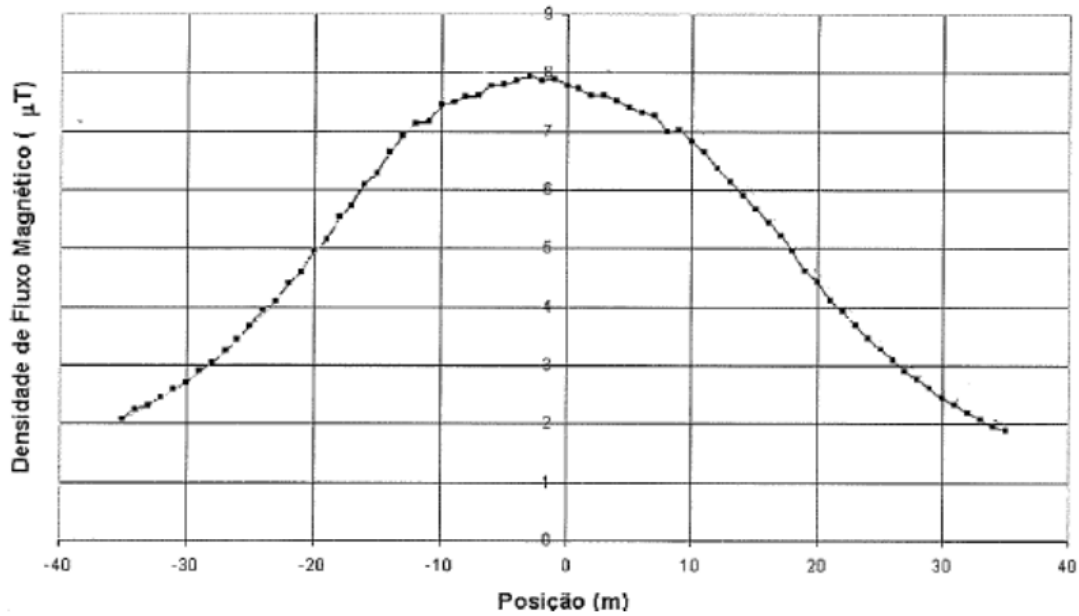
Figura 16 - Modelo da torre de transmissão usado por Guimarães (2005).



Fonte: (Guimarães, 2005).

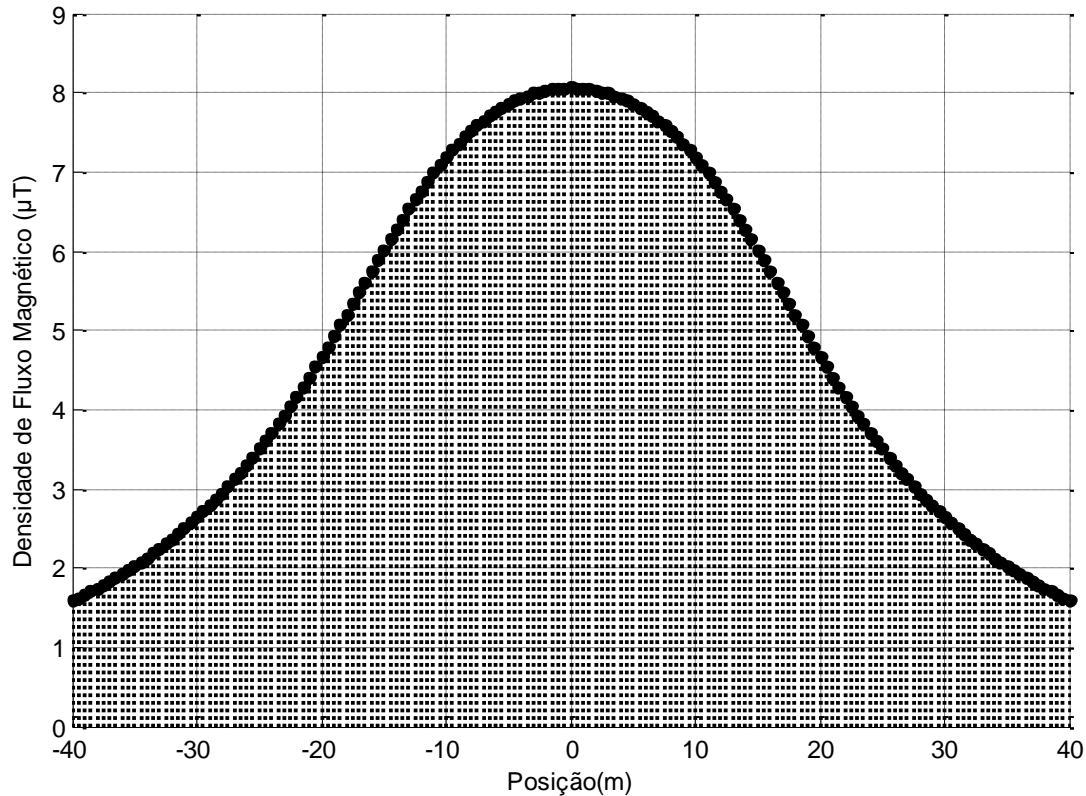
A comparação dos resultados é apresentada logo a seguir comparando a Figura 17 com a Figura 18 onde percebe a simetria do valor máximo de campo magnético no ponto central e nas extremidades do gráfico da literatura em contrapartida com as linhas apresentadas no gráfico do perfil do campo magnético obtido através do script desenvolvido em programa Matlab® neste trabalho, para a validação dos resultados expostos.

Figura 17 - Gráfico do perfil do campo magnético segundo Guimarães (2005).



Fonte: (Guimarães, 2005).

Figura 18 - Perfil do campo magnético plotado pelo script do trabalho.



Fonte: o autor.

A Tabela 05 expressa os valores das Figuras 17 e 18, demonstrando o cálculo final do campo magnético obtido por Guimarães (2005), que utiliza em seus cálculos uma corrente modelo de 650 A em um circuito simples simétrico relacionando os resultados alcançados



pelo programa desenvolvido neste trabalho o qual utiliza também, para fins de validação uma corrente de 650 A.

Tabela 05 - Comparativa de valores entre gráfico de Guimarães (2005) e valores do script.

Corrente 650 A	Posição/Valor Máximo de CM						-1m		7,99 $\mu\text{T}$		
Posição(m)	-40	-30	-20	-10	-5	0	5	10	20	30	40
CM ( $\mu\text{T}$ )	1,5	2,8	5,9	7,5	7,6	7,8	7,6	6,8	4,6	2,6	1,5
Corrente 650 A	Posição/Valor Máximo de CM						0m		8,06 $\mu\text{T}$		
Posição(m)	-40	-30	-20	-10	-5	0	5	10	20	30	40
CM ( $\mu\text{T}$ )	1,5	2,7	4,8	7,3	7,8	8,1	7,8	7,3	4,8	2,7	1,5

Fonte: o autor.

Analisando a Tabela 05 de comparação da medição do campo magnético total naquelas determinadas distâncias, pode concluir que a diferença entre os valores é inexpressiva quando comparado os resultados dos valores máximos de campo magnético que apresenta uma pequena variação de distancia de -1 metro do valor máximo encontrado por Guimarães (2005) enquanto a distancia do valor máximo obtido na plotagem do gráfico deste trabalho encontra-se na posição de simetria do eixo vertical a 0 metro.

Conclui que a diferença entre os máximos valores de campo magnético da literatura com a do script é de 0,98% quando avaliado o valor de 7,99 $\mu\text{T}$  de Guimarães (2005) com 8,09 $\mu\text{T}$  dos valores calculados neste trabalho.

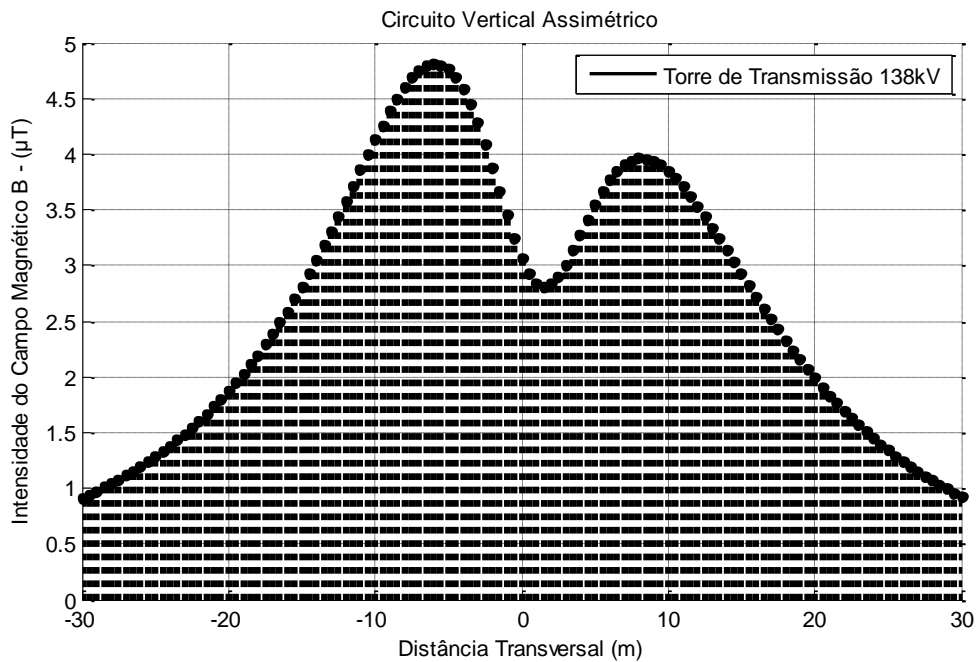
Também é verificado que abaixo do eixo de simetria a 0 metro a diferença do campo magnético fica em torno de 0,96% onde foram encontrados 7,8 $\mu\text{T}$  por Guimarães (2005) e 8,1 $\mu\text{T}$  neste trabalho.

Por fim averigua a enorme proximidade de valores computados e aferidos na extremidade da faixa de passagem onde se encontram valores de 1,5 $\mu\text{T}$  demonstrando dados consistentes e satisfatórios para a validação dos resultados obtidos deste trabalho.

## 5.2 Análise do campo magnético em relação a configuração geométrica da linha de transmissão

A Figura 19 a seguir representa a torre autoportante de circuito horizontal simples com capacidade de transmissão de 35 MVA com tensão de operação de 138 kV com base piramidal.

Figura 19 – Perfil do campo magnético para o Sistema 1.



Fonte: o autor.

Observa-se que é um sistema assimétrico pela divergência no valor máximo do campo magnético comparando no gráfico seus valores a -6 metros e a +8 metros de distancia a partir do eixo de simetria (fase 'B').

Nota-se também que o valor máximo explicito no gráfico explica-se pelo fato de duas (fase A e fase C) das três fases (ABC) estarem situadas naquele referente lado podendo ser observado na Figura 19 um campo magnético de 4,81 μT a cinco metros a esquerda (-6 m) da referencia (eixo vertical a 0 metro) enquanto o máximo valor de campo situado a direita da torre esta a 8,12 metros com valor de 3,96 μT .

Tabela 06 – Informações numéricas referente ao campo magnético do Sistema 1.

1000A	Posição/Valor Máximo							-6m	4,81 μT	8,12m	3,96 μT		
Posição (m)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
CM (μT)	0,91	1,28	1,87	2,81	4,12	4,76	3,07	3,55	3,84	2,92	1,98	1,34	0,92

Fonte: o autor.

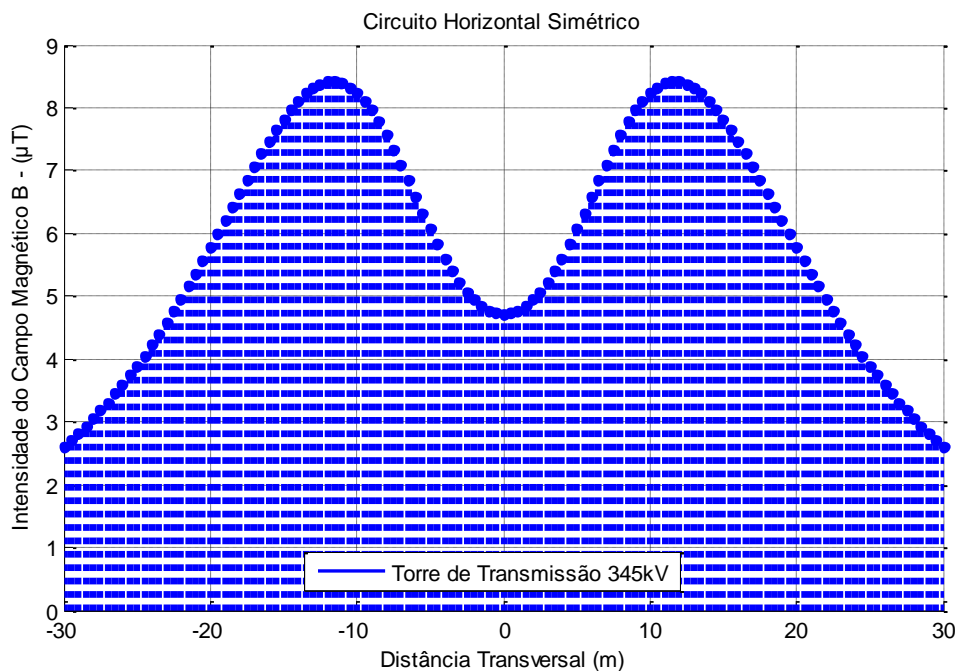
A Tabela 06 mostra em sua característica o segundo menor valor de campo magnético na extremidade da faixa de passagem atingindo valores de  $0,91 \mu\text{T}$ .

Pode-se concluir que as variações partindo da referência a 0 metro para o limite da faixa de passagem a 30 metros não ultrapassam em momento algum a diferença de 0,92%.

Observa-se também pela Tabela 05 que a maior diferença entre os valores medidos do campo magnético está a distância transversal de 5 metros apresentando uma variação de 0,74%.

A Figura 20 a seguir representa a torre autoportante com base piramidal invertida, de circuito horizontal simples com capacidade de transmissão de 250 MVA com tensão de operação de 345 kV correspondente ao Sistema 2.

Figura 20 – Perfil do campo magnético para o Sistema 2



Fonte: o autor.

Tal sistema é o que apresenta o maior valor máximo de campo magnético quando comparado a todos os demais sistemas com valores chegando a  $8,31 \mu\text{T}$ .

Pela simetria da linha no gráfico é também comprovada a denominação do sistema sendo chamado de sistema simétrico.

Tabela 07 – Informações numéricas referente ao campo magnético do Sistema 2.

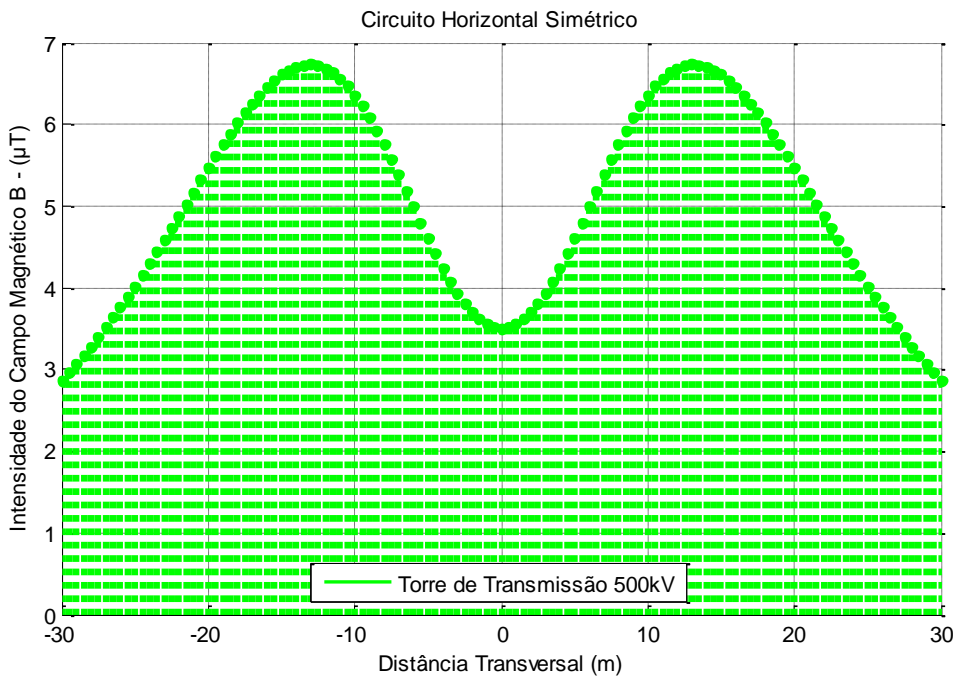
1000A	Posição/Valor Máximo de CM							-11,5m	8,31 $\mu\text{T}$	11,5m	8,31 $\mu\text{T}$		
Posição (m)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
CM ( $\mu\text{T}$ )	2,60	3,89	5,77	7,82	8,23	6,07	4,72	6,07	8,23	7,82	5,77	3,89	2,60

Fonte: o autor.

A Tabela 07 confirma a total simétrica do campo magnético quando analisa e compara ponto a ponto da distância transversal à estrutura da torre assinalando que os valores encontrados são exatamente iguais em ambos os lados da faixa de passagem.

A Figura 21 representa a torre de aspecto estaiada em formato de ‘V’ de circuito horizontal simples com capacidade de transmissão de 725 MVA com tensão de operação de 500 kV correspondente ao Sistema 3.

Figura 21 – Perfil do campo magnético para o Sistema 3



Fonte: o autor.

Observa-se nesse sistema o segundo maior valor de campo magnético localizado a aproximadamente 13 metros do eixo de referência da fase ‘C’(0 m).

Tal sistema apresenta uma peculiaridade com o formato da letra ‘M’ podendo ser apresentado e comprovado como um sistema não assimétrico.

Tabela 08 – Informações numéricas referente ao campo magnético do Sistema 3.

1000 <sup>a</sup>	Posição/Valor Máximo							-13m	6,74 $\mu\text{T}$	13m	6,74 $\mu\text{T}$		
Posição (m)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
CM ( $\mu\text{T}$ )	2,85	4,02	5,46	6,61	6,35	4,60	3,50	4,60	6,35	6,61	5,46	4,02	2,85

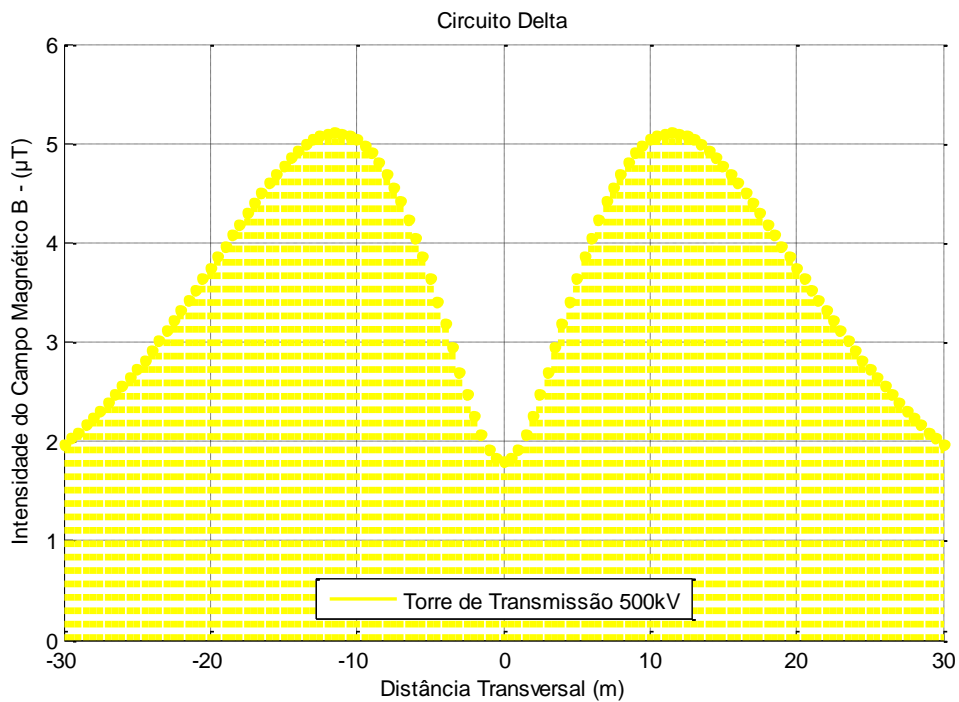
Fonte: o autor.

A Tabela 08 apresenta uma total simétrica do campo magnético quando se analisa e compara ponto a ponto da distância transversal à estrutura da torre assinalando que os valores encontrados são exatamente iguais em ambos os lados da faixa de passagem.

Nota-se também que esse modelo geométrico de torre é o que apresenta maior valor na região transversal da mesma no limite da faixa de passagem a 30 metros do eixo de referência de ambos os lados com valor de 2,85  $\mu\text{T}$ .

A Figura 22 representa a torre de aspecto estaiada de base piramidal invertida com circuito simples em delta com operação de transmissão com tensão de 500 kV correspondente ao Sistema 4 deste trabalho.

Figura 22 – Perfil do campo magnético para o Sistema 4



Fonte: o autor.

Observa-se que é o segundo menor valor situado no eixo de referência (0 m) quando comparado aos demais sistemas deste trabalho computando valores abaixo de 2  $\mu\text{T}$ .

Também é um sistema simétrico como se pode perceber pelo gráfico onde seus valores de campo magnético máximo estão a aproximadamente a -11,5 e +11,5 metros distantes do eixo de simetria a 0 metro.

Tabela 09 – Informações numéricas referente ao campo magnético do Sistema 4.

1000A	Posição/Valor Máximo							-11,5m	5,11 $\mu\text{T}$	11,5m	5,11 $\mu\text{T}$		
Posição (m)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
CM ( $\mu\text{T}$ )	1,96	2,73	3,75	4,78	5,04	3,64	1,79	3,64	5,04	4,78	3,75	2,73	1,96

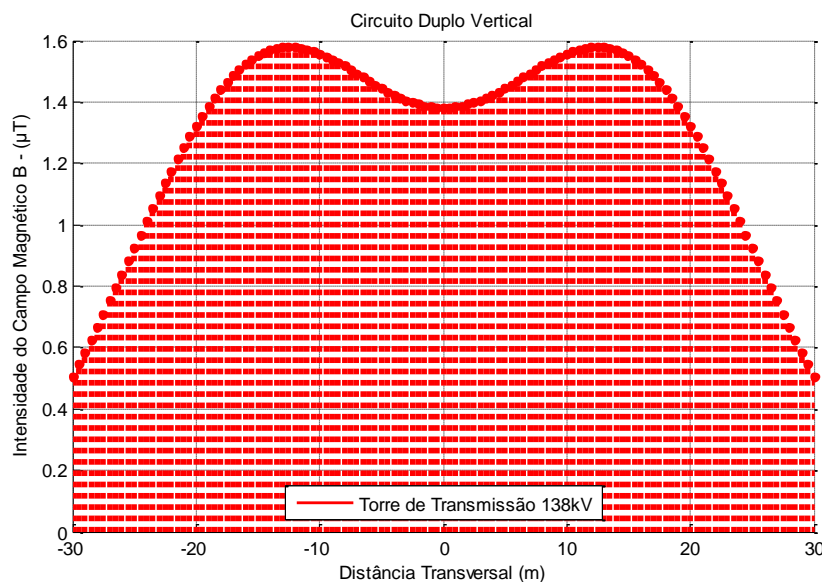
Fonte: O Autor.

A Tabela 09 confirma a total simétrica do campo magnético quando analisa e compara ponto a ponto da distância transversal à estrutura da torre assinalando que os valores encontrados são exatamente iguais em ambos os lados da faixa de passagem.

Fica explícito que em -11,5 metros e +11,5 metros, -30 metros e + 30 metros da distancia transversal os valores de campo magnético computado são respectivamente  $5,11 \mu\text{T}$  e  $1,96 \mu\text{T}$ .

A Figura 23 a seguir representa a torre de aspecto autoportante com base piramidal, circuito duplo vertical com operação de transmissão com tensão de 138 kV correspondente ao Sistema 5.

Figura 23 – Perfil do campo magnético para o Sistema 5



Fonte: o autor.

É o perfil geométrico de torre que apresenta os menores valores máximos e mínimos de todos os demais sistemas quando observado seus gráficos, sendo respectivamente  $1,59 \mu\text{T}$  e  $0,5 \mu\text{T}$ .

Tal uniformidade de seu campo magnético é explicada pela presença do circuito duplo onde os condutores estando em paralelo geram campos magnéticos que se anulam devido à direção da corrente.

Tabela 10 – Informações numéricas referente ao campo magnético do Sistema 5.

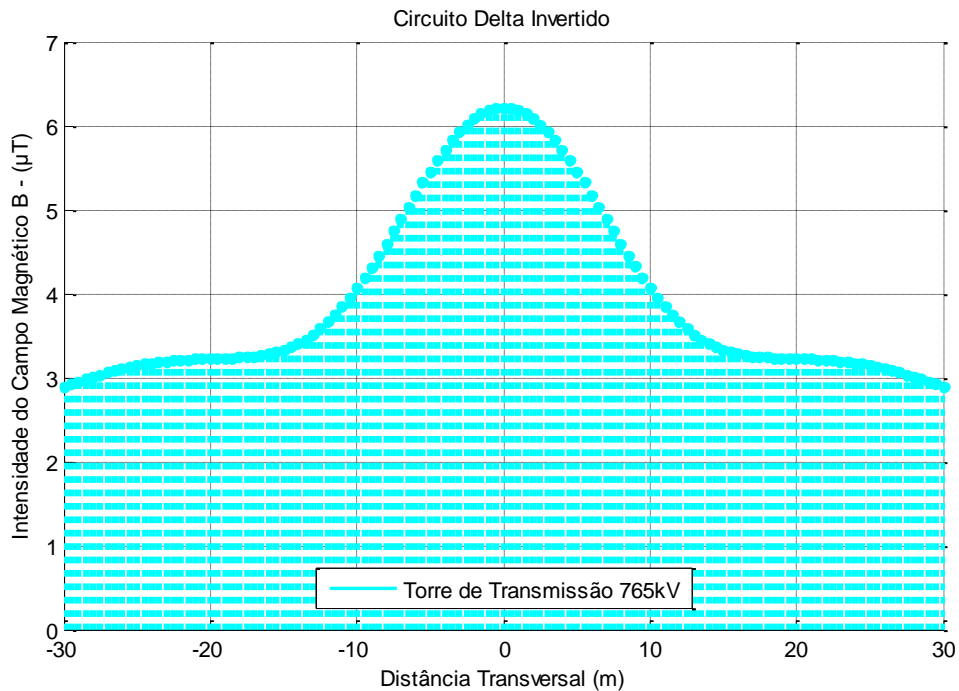
1000A	Posição/Valor Máximo							-12,5m	1,59 $\mu\text{T}$	12,5m	1,59 $\mu\text{T}$		
Posição (m)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
CM ( $\mu\text{T}$ )	0,50	0,92	1,32	1,55	1,56	1,44	1,38	1,44	1,56	1,55	1,32	0,92	0,50

Fonte: o autor.

A Tabela 10 demonstra a total simétrica do campo magnético quando analisa e compara ponto a ponto da distância transversal à estrutura da torre assinalando que os valores encontrados são exatamente iguais em ambos os lados da faixa de passagem.

A Figura 24 a seguir representa a torre de aspecto estaiada com sua base em formato de ‘V’, é denominado delta invertido devido a posição das fases estarem em formato de um triângulo inverso, com operação de transmissão com tensão de 765 kV correspondendo ao Sistema 6.

Figura 24 – Perfil do campo magnético para o Sistema 6



Fonte: o autor.

A geometria do Sistema 6 é a que apresenta o maior valor na região do eixo de referência (0m) que é simétrico ao eixo da fase ‘B’ correspondendo a um campo magnético de  $6,22\mu\text{T}$ .

Observa-se que os valores no limite da faixa de passagem estão entre os maiores explícitos no gráfico significando  $2,89\mu\text{T}$ .

Tabela 11 – Informações numéricas referente ao campo magnético do Sistema 6.

1000A	Posição/Valor Máximo							0 m	6,22 $\mu\text{T}$					
Posição (m)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	
CM ( $\mu\text{T}$ )	2,89	3,14	3,23	3,33	4,06	5,46	6,22	5,46	4,06	3,33	3,23	3,14	2,89	

Fonte: o autor.

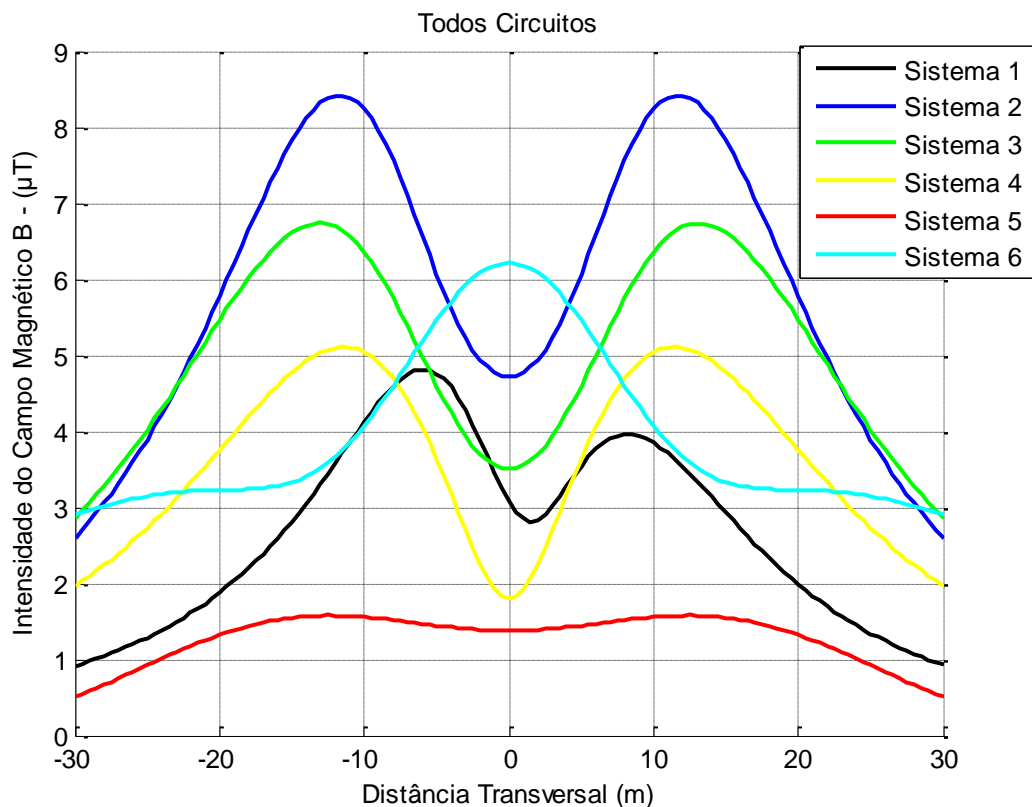
A Tabela 11 confirma a total simétrica do campo magnético quando analisa e compara ponto a ponto da distância transversal à estrutura da torre assinalando que os valores encontrados são exatamente iguais em ambos os lados da faixa de passagem.

Comprova que a geometria da torre do Sistema 6 influencia no valor máximo de campo magnético por apresentar sua fase 'B' a 17 metros acima do solo, enquanto as demais fases ('A' e 'C') estão situadas a 29 metros, podendo ser visualizado o ápice do campo na Figura 24 e comprovado na Tabela 11 o valor computado de  $6,22 \mu\text{T}$ .

### 5.3 Todos os sistemas

A seguir, a Figura 25 apresenta a sobreposição de todos os gráficos expostos anteriormente admitindo que seja utilizado apenas para comprovar que a forma geométrica da torre de cada sistema de transmissão influencia significativamente no comportamento do campo magnético avaliado no perfil transversal (na faixa de passagem), considerando um valor de corrente definido em 1000 A. Sendo assim demonstra e comprova a real variação do perfil do campo correlacionando às formas geométricas das torres de transmissão.

Figura 25 – Perfil do campo magnético para todos os sistemas.



Fonte: o autor.



Segundo o comitê internacional de proteção a radiação não ionizante (ICNIRP, 2001), associação brasileira de normas técnicas (ABNT, 2000; NBR 15145, 2006) e instituto de energia elétrica e engenharia eletrônica (IEEE-C95.6, 2002), os valores de campo magnético para os sistemas apresentados na simulação estão todos dentro dos limites de exposição a seres humanos e estruturas, não contrariando a norma em vigência.

Tabela 12 – Informações numéricas referentes ao campo magnético de todos os sistemas.

Torres de Alta Transmissão	Campo Magnético ( $\mu T$ )								
	Posição(m)/Valor Máximo ( $\mu T$ )				Posição Central 0 metro	Posição Média -15m a 15m		Posição Limite -30m a 30m	
Sistema 1	-6m	4,81	+8,12m	3,96	3,07	2,81	2,92	0,91	0,92
Sistema 2	-11,5		8,31		4,72	7,82	7,82	2,60	2,60
Sistema 3	-13		6,74		3,50	6,61	6,61	2,85	2,85
Sistema 4	-11,5		5,11		1,79	4,78	4,78	1,96	1,96
Sistema 5	-12,5		1,59		1,38	1,55	1,55	0,50	0,50
Sistema 6	0		6,22		6,22	3,33	3,33	2,89	2,89

Fonte: o autor

Nota-se pela Figura 24 que os sistemas 2 e 3 são similares devido a sua iguais distancia entre as fases ‘A’, ‘B’ e ‘C’ como já demonstrado anteriormente na Figura 03 e Figura 4 estando tais fase a uma distância de 14 metros e 16,53 metros do solo respectivamente tendo os maiores valores máximos de campo computados em 8,31  $\mu T$  e 6,74  $\mu T$  para o Sistema 2 e Sistema 3 concomitantemente.

O Sistema 4 é similar ao formato do Sistema 2 e 3 mas seu valor no eixo de referencia esta explicito como o segundo menor valor mínimo obtido devido a fase de simetria ‘B’ estar mais distante do solo em relação as outras fases com valor representativo de 5,11  $\mu T$  a exatamente 25 metros do solo.

O Sistema 6 apresenta um valor limite extremo na faixa de passagem de 2,89  $\mu T$  se comparado ao modelo geométrico da linha do Sistema 3 com 2,85  $\mu T$ , sendo explicado tal valor máximo do Sistema 6 devido a altura de sua fase central (fase ‘B’) estar mais próxima do solo a uma distancia de 17 metros como mostrado na Figura 07 em contrapartida com as demais fases que estão a 29 metros de altura (fase ‘A’ e fase ‘C’).

É percebido a assimetria do circuito do Sistema 1 observando suas linhas na Figura 19 e mostrado na Tabela 06 onde apresenta dois valores máximos pela disposição das fases em relação a torre, sendo o somatório das fases ‘A’ e ‘C’ gerando um campo de 4,81  $\mu T$  e a fase ‘B’ contribuindo para o valor final de 3,96  $\mu T$  nas posições de -6 metros e 8,12 metros respectivamente.

Percebe-se na avaliação das Figuras 19 e 23 que os circuitos 1 e 5 são os que melhor se comportam sobre as altas tensões visto os menores valores de campo magnético na extremidade da faixa de passagem computado os respectivos valores de  $0,92\mu\text{T}$  e  $0,50\mu\text{T}$  como demonstrado nas Tabelas 06 e 10.

Por fim pode-se concluir através da representação da plotagem do Sistema 5 condizendo com a geometria da torre que menor influencia o meio por ação de seus campos magnéticos, sendo atribuído tal acontecimento ao circuito duplo como também pela simetria das fases entre si que minimizam o campo magnético oriundo das altas corrente que circulam pela linha de transmissão.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho propõe calcular o campo magnético envolto nos condutores de uma linha de transmissão gerados pela corrente que neles circunda, bem como comprovar que a geometria da torre da linha de transmissão influencia diretamente no comportamento do campo magnético, utilizando como ferramenta computacional o programa Matlab® para os cálculos, devido à alta complexidade dos mesmos.

O foco principal do trabalho é demonstrar através da modelagem matemática e simulação computacional que a geometria da estrutura influencia diretamente no comportamento do campo magnético. Tal estudo baseia-se em literaturas fundamentadas e comprovadas, aqui já mencionadas e considera para a modelagem computacional a lei circuital de ampere, método das imagens e modelagem do efeito solo por meio do modelamento do método via plano complexo das imagens segundo Deri (1981), sintetizado para chegar a equação geral de campo magnético máximo total em um determinado ponto como demonstrado no capítulo 4 pela Equação 15.

O primeiro sistema apresentado é o único sistema assimétrico dentre os demais sistemas quando é analisado e apontado dois valores máximos assimétricos unilaterais referente ao eixo de simetria, explicitando a linha da curva do gráfico com a simetria da forma geométrica da torre podendo ser comprovado que o somatório dos campos das fases 'A' e 'C' é que contribuem para a deformação do gráfico a -6 metros do eixo quando comparado ao valor de campo magnético a +6 metros. Sendo um modelo de torre onde sua faixa de passagem estará deslocada do eixo de referência, exatamente pela assimetria da linha do gráfico, tendo de ser levado isso em consideração na hora de sua implementação.

O circuito do Sistema 2 apresenta uma configuração de cabos que pode ser analisada e concluída que as fases 'A' e 'C', exercem uma anulação do campo magnético no marco zero referenciado no ponto central em relação a fase 'B'. Contudo o gráfico gerado pela modelação matemática e suscitado pelo programa computacional fica em formato simétrico originando dois valores máximos equidistantes do centro para as extremidades da margem de segurança, assim como seus valores mínimos harmônicos calculados na extremidade ao eixo de referência, comparando a linha do gráfico com a geometria da torre pelo fato dos condutores estarem equidistantes entre si, e em relação ao solo de acordo com o indicado formato geométrico.

Para o Sistema 3 conclui-se que é um sistema análogo ao Sistema 2 apontando como diferenciação do valor de campo magnético a altura das fases, onde no Sistema 3 as fases estão 2 metros superior ao solo em comparação com as fases do sistema anterior.

O Sistema 4 assemelha com as linhas de gráfico do Sistema 2 e 3 porém seu valores são inferiores devido a altitude das fases em relação ao solo onde, nesse sistema denominado de delta, a fase 'B' está acima das demais fases 'A' e 'C' originando assim a deformação do campo magnético conforme ilustrado pelo gráfico da Figura 23.

Nota-se que a representação gráfica do Sistema 5 é assemelhada a configuração geométrica da torres, quando levado em consideração um sistema que necessita de um circuito duplo para o custo-eficácia-eficiência da transmissão, sendo este o principal motivo da linha do gráfico ter a menor área expressiva em relação ao valor do campo magnético, apresentando o circuito que menos envolvente a faixa de passagem pelo fato dos campos dos condutores anularem entre si a força particular gerada pelos fios unitários.

O último sistema apresentado e discutido neste trabalho é o que apresenta o enfoco de seu campo magnético no centro do eixo de referência, justificado pelo fato de sua fase 'B' estar centralizada 12 metros mais próximo ao solo do que as outras fases, sofrendo pouca anulação das demais simulando uma linha de gráfico em formato da letra 'A', porém com um dos valores mínimos mais expressivos calculados de campo magnético na extensão extrema sobre a faixa de passagem. Este trabalho referencia como sendo o melhor modelo geométrico ressaltando e sobressaindo à possibilidade do projeto quando for implementado pelo fato de apresentar o maior valor de campo magnético no eixo de referencia, sobrepondo em vantagens aos demais modelos geométricos de torres de linha de transmissão.

Comprovado a influência que exerce a geometria da torre de transmissão no comportamento do campo eletromagnético, tal estudo se faz importante na implementação dos novos projetos de linha de transmissão quando se leva em consideração os riscos implícitos a seres vivos e estruturas, estando tais sistemas a cima expostos em conformidade com as normas vigentes ao assunto segundo as bibliografias aqui citadas.

Por fim, este trabalho contribui para novos estudos do comportamento do campo magnético, como também para análises futuras incluindo estruturas metálicas dentro da faixa de passagem e/ou próximas as linhas de transmissão, para fins de calcular tensões e correntes induzidas nas mesmas.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **Limites para a Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos Variáveis no Tempo (até 300 GHz)**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.
- ABRATE. **Associados Abrate**. Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.abrate.com.br/associados.asp>>. Acesso em: 09 dez. 2016.
- ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicac/ResumoEstadual/ResumoEstadual.asp>>. Acesso em: 08 jul. 2016.
- ANEEL. **Energia Elétrica Chega a 97,8% dos Domicílios Brasileiros, Mostra Censo Demográfico**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/11/energia-eletrica-chega-a-97-8-dos-domicilios-brasileiros-mostra-censo-demografico>>. Acesso em: 11 jan. 2017.
- ANEEL. **Matriz de Energia Elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicac/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>. Acesso em: 08 jul. 2016.
- CAMARGO, M. G. B. C. **O Setor Elétrico Brasileiro e sua Normatização Contemporânea**. Dissertação de Mestrado: UNISANTOS, 2005.
- CAVASSINI, R. S. **Uma Abordagem Multicritérios para Recapitação de Linhas de Transmissão**, Curitiba - PR: Dissertação de Mestrado, 2011.
- CEMIG. **Características da Linha - LT São Gonçalo do Pará - Ouro Preto "2", 500 kV**, 1988.
- CEMIG. **Características da Linha - LT Janaúba - Salinas, 138 kV**, 1996.
- CEMIG. **Características da Linha - LT Pimenta - Barbacena, 345 kV**, 1988.
- 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**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100, pp. 3686-3694, August 1981.
- FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica**. LTC/EFEI, 1977.
- GONÇALVES, F. A.; LOPES, E. J. C. R. **Instalação de Subestações Pré-Fabricadas na Faixa de Passagem de Linhas de Transmissão**. Eletricidade Moderna, vol. ano XXXVII, 2008.
- GUIMARÃES, G. E. **Medições e Cálculos de Campos Elétricos e Magnéticos de uma Linha de Transmissão De 500 Kv**. Belo Horizonte - MG: Dissertação de Mestrado, 2005.

HAFEMEISTER, D. **Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields**. Physics and Society, p. 314, 1996.

HAVAS, M. **Biological Effects of Low Frequency Electromagnetic Fields**. Environmental & Resource Studies, London, Spon Press, 2004, pp. 207-232.

ICNIRP. **Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Eletromagnetic Fields (up to 300 GHz)**. International Commission on Non-ionizing Radiation Protection Technical Report, 2001.

IEEE-C95.6. **Standart of Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 to 3KHz**. Piscataway, N. J.:Subcommittee 3 of Standards Coordinating Subcommittee 28, 2002.

IEEE 644-1994. **Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Eletric and Magnetic Fields From AC Power Lines**. New York: IEEE, 1994 (R2008), (IEEE Std. 644-1994)

JUNIOR; W. D. Stevenson. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**, São Paulo: McGraw-Hill, 1974.

KOIFMAN, S.; LAND, M. G. P.; MORENO, R. F.; KOIFMAN, R. J.; MATTOS, I. E. **Avaliação dos Efeitos Biológicos em Populações Expostas a Campos Magnéticos de Baixa Frequência**". Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL/CTEEP/FDTE, n. Ciclo 2002/2003, 2003.

LTD, ESKOM. HOLDINGS. **Electric and Magnetic Fields from Overhead Power Lines: a summary of technical and biological aspets**. Empetus Close Corporation, 2006.

LÚCIO, 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**. São João Del Rei: UFSJ, 2012.

MORENO, R. F. **Campos Eletromagnéticos e Saúde Humana: o fato e o mito**. XVIII SNPTEE, 18 Outubro 2005.

MORGAN, M. G.; SLOVIC,P.; NAIR, I.; GEISLER, D.; MACGREGOR, D.; FISCHHOFF, B.; LINCOLN, D.; FLORIG, K. **Powerline Frequency Eletric and Magnetic Fields - A Pilot Study of Risk Perception**, vol. 5, Society for Risk Analysis, 1985.

NBR 5422. **Projetos de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - 1985.

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 (ABNT) - 2006.

NETO, A. M.; BARBOSA, C. R. N.; DOMINGUES, L. A. D. M. C.; SILVA FILHO, J. I. D.; ANDRADE, V. H. G. D.; H. JÚNIOR D. P. A.; OLIVEIRA, P. R. G. D. Desenvolvimento e Aplicação de Metodologias para Análise do Desempenho de Linhas de Transmissão. In.: **SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Outubro 2007.

ROBBA, E. J.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; SCHMIDT, H. P.; KAGAN, N. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência**. São Paulo: Edgard Blucher, 1972.

SADIKU, M. N. O. **Elementos do Eletromagnetismo**, 3<sup>a</sup> ed., Bookman, 2004.

SANTOS, M. G. D. **Acoplamento Elétrico entre Linhas de Transmissão Operando em Regime Permanente e Dutos Metálicos Aéreos**. São João Del Rei: UFSF, 2011.

SCHROEDER, M. A. **Concepção de um Sistema para Extração de Energia Elétrica de Linhas de Transmissão Através de Acoplamento Magnético**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE): Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 1996.

SILVA, R. M. D. C. **Estudo da Exposição Humana a Campos Elétricos e Magnéticos na Frequência Industrial Utilizando Métodos Numéricos**. Rio de Janeiro: Trabalho Final de Curso, 2009.

VIEIRA, H. R. **Acoplamento Magnético entre Linhas de Transmissão Operando em Regime Permanente e Dutos Metálicos Aéreos**. 2013. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João Del Rei, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2013.