

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS  
ENGENHARIA ELÉTRICA  
CLAYTON ROBERTO VALLIM FURTUNATO**

**ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO NAS PROXIMIDADES DE  
UMA LINHA DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE:  
verificação de valores de acordo com a norma**

**Varginha  
2017**

**CLAYTON ROBERTO VALLIM FURTUNATO**

**ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO NAS PROXIMIDADES DE  
UMA LINHA DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE:  
verificação de valores de acordo com a norma**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em 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  
2017**

**CLAYTON ROBERTO VALLIM FURTUNATO**

**ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO NAS PROXIMIDADES DE  
UMA LINHA DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE:  
verificação de valores de acordo com a norma**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Bacharelado em 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:        /        /

---

Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira

---

Prof. Esp. Roberto Lazarino Mudesto

---

Prof. Esp. Paulo Roberto Paiva Novo

**OBS.:**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida. Sem ele não teria forças para superar essa longa jornada.

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por iluminar meus caminhos durante esta jornada e colocar pessoas especiais em minha vida. Estas pessoas foram meus melhores amigos e anjos da guarda em momentos de fraqueza, compartilhando alegrias e tristezas durante estes cinco anos de caminhada a qual estará para o resto da vida em minha memória!

Ah... seus nomes são: Meus queridos pais Cláudio e Cleide; Minha irmã Ana Cláudia; Minha esposa Paula (conheci no show do Nando Reis e ela mal sabia que a luta para vencer a faculdade estava só começando... apoio em regime permanente!); Meus grandes amigos Jaderson (mais conhecido como Jarbas), Rafael Kerner, Meus companheiros inseparáveis de Iniciação Científica e grandes amigos Professor Hugo, Professora Deborah (corajosos ao embarcarem em minhas loucuras científicas). “in memoriam” tio Walter, tia Clair, tia Sônia, vô Bráz e vó Elza (infelizmente não tive oportunidade de conhecê-la).

Não posso esquecer uma coisa, agradeço muito as pessoas que disseram que não seria capaz de realizar grandes conquistas, vejam só o que eu consegui!

“Julgue seu sucesso pelas coisas que você teve  
que renunciar para conseguir.”

Dalai Lama

## RESUMO

Por questões de segurança relativas à interação dos campos eletromagnéticos criados pelas linhas de transmissão com seres humanos e demais elementos situados dentro de sua respectiva faixa de passagem, a comunidade científica vem esforçando-se para elaborar normas e soluções que minimizam a radiação, de natureza não ionizante, em regiões adjacentes. Diante do exposto, este trabalho realiza uma análise relativa aos níveis de campo elétrico e magnético nas proximidades de uma linha de transmissão operando em regime permanente. O objetivo proposto foi alcançado realizando a modelagem eletromagnética via simulação computacional, aplicando em seu *script* algumas das Equações de Maxwell e alguns teoremas e métodos adicionais (RMG, método das imagens complexas, teorema da superposição e modelagem do solo). Seguindo criteriosas sequências metodológicas e utilizando parâmetros específicos dos modelos reais de linhas de transmissão, tais como suas características geométricas e elétricas, estes dados foram inseridos ao programa computacional em *Matlab*<sup>®</sup>, no qual tais valores resultantes dos equacionamentos, são apresentados por meio de gráficos e tabelas configurados na mesma escala de medição divulgados na literatura. Os resultados obtidos foram concordantes com os valores quantificados (*in loco*) e estimados na literatura, comprovando a consistência física da metodologia aplicada.

**Palavras-chave:** Campo elétrico. Campo magnético. Equações de Maxwell. *Matlab*<sup>®</sup>.

## **ABSTRACT**

*The scientific community is making an effort to take measures to minimize the non-ionizing radiation in nearby regions as regards safety in operating electromagnetic fields made by transmission lines, human beings and other elements which are placed in the passage strip, thus this work analyses electric and magnetic field levels which are close to permanently operating transmission lines. The proposed goal was achieved through a computer simulation on an electromagnetic model, applying Maxwell equations as well some theorems and additional methods, e.g. RMG, complex images method, superposition theorem and soil modeling. Following a sequence of methodic criteria and using specific parameters of real models of transmission lines and regarding its geometric and electric characteristics, the collected data was fed onto a computer program known as Matlab®, in which the equations outcomes are shown through charts and tables set to the same measuring scale published in the literature. The obtained results are a match to the (in loco) estimated quantified values in the literature, providing the physical consistency of the applied methods.*

**Keywords:** *Electric field, Magnetic field, Maxwell Equations, Matlab®.*

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais S.A.

C.M – Campo Magnético

F/m – Farad por metro

H/m – Henry por metro

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IRPA – International Radiation Protection Association

L.T. – Linha de Transmissão

MATLAB – Matrix Laboratory

MSC – Método de Simulação de Cargas

MI – Método das Imagens

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PNDA – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

RMG – Raio Médio Geométrico

SEB – Sistema Elétrico Brasileiro

SEP – Sistema Elétrico de Potência

S/m – Siemens por metro

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação para definição da altura média dos condutores de uma linha de transmissão em relação ao solo .....	29
Equação 2 – Equação para obter o valor relativo à flecha.....	30
Equação 3 – Equação para determinar o raio médio geométrico para dois subcondutores.....	30
Equação 4 – Equação para determinar o raio médio geométrico para três subcondutores .....	30
Equação 5 – Equação para determinar o raio médio geométrico para quatro subcondutores .	30
Equação 6 – Equação para obtenção da corrente nas fases para um sistema trifásico .....	31
Equação 7.a – Equação para obter o valor da corrente na fase A para uma sequência de fase ABC .....	31
Equação 7.b – Equação para obter o valor da corrente na fase B para uma sequência de fase ABC .....	31
Equação 7.c – Equação para obter o valor da corrente na fase C para uma sequência de fase ABC .....	31
Equação 8.a – Equação para obter o valor de corrente na fase A para uma sequência de fase CBA .....	32
Equação 8.b – Equação para obter o valor de corrente na fase B para uma sequência de fase CBA .....	32
Equação 8.C – Equação para obter o valor de corrente na fase C para uma sequência de fase CBA .....	32
Equação 9 – Equação para obter o valor do campo elétrico em um ponto genérico (P) .....	37
Equação 10 – Equação generalizada para estimar o campo elétrico em função de vetores unitários para definição da direção e sentido do campo.....	38
Equação 11 – Equação para definir o vetor densidade linear de carga em todos os condutores do sistema sob estudo.....	39
Equação 12.a – Equação para definição dos valores dos coeficientes de potenciais de Maxwell do condutor real.....	39
Equação 12.b – Equação para definição dos valores dos coeficientes de potenciais de Maxwell para a imagem do condutor real .....	39
Equação 13 – Campo elétrico gerado por uma linha de transmissão em função de vetores unitários ao longo dos eixos y e z.....	41
Equação 14.a – Campo elétrico total no eixo y em função das componentes senoidais do campo no tempo .....	42

Equação 14.b – Campo elétrico total no eixo z em função das componentes senoidais do campo no tempo .....	42
Equação 15.a – Equação para representação do campo elétrico no domínio fasorial em Função do eixo y .....	42
Equação 15.b – Equação para representação do campo elétrico no domínio fasorial em Função do eixo z .....	42
Equação 16 – Equação para o campo elétrico total no domínio fasorial .....	42
Equação 17 – Equação para o módulo do campo elétrico máximo .....	43
Equação 18.a – Equação para o módulo do campo elétrico em função do eixo y .....	43
Equação 18.b – Equação para o módulo do campo elétrico em função do eixo z .....	43
Equação 19 – Equação para o cálculo da corrente de linha.....	44
Equação 20 – Equação referente à Lei de Ampère para fenômenos quase estáticos.....	47
Equação 21 – Equação para obtenção do valor da intensidade de campo magnético.....	47
Equação 22 – Equação para determinar o valor do vetor unitário que referencia a direção e o sentido do campo magnético relativo ao ponto de observação.....	47
Equação 23.a – Equação para determinar a intensidade de campo magnético total para um sistema monofásico .....	49
Equação 23.b – Equação generalizada para determinar a intensidade de campo magnético total para um sistema trifásico .....	49
Equação 24 – Equação para determinar a profundidade complexa “p” .....	50
Equação 25 – Equação reduzida para se determinar a profundidade complexa “p” .....	51
Equação 26 – Equação para determinar a intensidade de campo magnético total com a inclusão da profundidade complexa “p” .....	52
Equação 27 – Equação para obtenção do vetor densidade de fluxo magnético.....	52
Equação 28 – Equação para obtenção da intensidade de campo magnético total a partir do método das imagens complexas para um sistema trifásico .....	53
Equação 29 – Equação que define o vetor que aponta do elemento de corrente do objeto real para o ponto de observação do campo magnético .....	53
Equação 30 – Equação que define o módulo do elemento de corrente relativo ao objeto real que aponta para o ponto de observação do campo magnético.....	54
Equação 31 – Equação para obter o valor do vetor unitário do objeto real dos elementos de corrente .....	54
Equação 32 – Equação que define o vetor que aponta do elemento de corrente da imagem do objeto para o ponto de observação do campo magnético .....	54

Equação 33 – Equação que define o módulo do elemento de corrente relativo à imagem do objeto que aponta para o ponto de observação do campo magnético.....	54
Equação 34 – Equação para obter o valor do vetor unitário da imagem dos elementos de corrente .....	54
Equação 35 – Equação para determinar o valor da intensidade de campo magnético total em um determinado ponto de observação .....	55
Equação 36 – Equação para determinar o valor da intensidade de campo magnético total para um sistema trifásico em função de um ponto genérico P .....	55
Equação 37 – Equação para determinar o valor da densidade de fluxo magnético total .....	55
Equação 38 – Equação que determina o valor total da intensidade de campo magnético considerando os módulos finais da componente “x” assumindo a forma de número complexo .....	55
Equação 39 – Equação que determina o valor total da intensidade de campo magnético considerando os módulos finais da componente “z” assumindo a forma de número complexo .....	56
Equação 40 – Equação que determina o valor do módulo da intensidade de campo magnético máximo considerando os módulos finais da componente “x”.....	56
Equação 41 – Equação que determina o valor do módulo da intensidade de campo magnético máximo considerando os módulos finais da componente “z” .....	56
Equação 42 – Equação para determinar o valor da intensidade de campo magnético total máximo considerando o módulo das parcelas obtidas nos eixos “x” e “z” .....	56
Equação 43 – Equação para obter a densidade de fluxo magnético total máximo.....	56
Equação 44 – Equação que representa a variação percentual entre os valores máximos dos níveis de campo elétrico em função dos valores limítrofes permitidos por norma .....	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapeamento organizacional e os agentes do setor elétrico nacional.....	22
Figura 2 – Silhueta da torre do Sistema 1 – Linhas de Transmissão de 138 kV. ....	26
Figura 3 – Silhueta da torre do Sistema 2 – Linhas de transmissão de 345 kV. ....	27
Figura 4 – Silhueta da torre do Sistema 3 – Linha de transmissão de 500 kV.....	28
Figura 5 – Elementos relativos à altura média. ....	29
Figura 6 – Cabos com múltiplos condutores. ....	30
Figura 7 – Sequência ABC de um sistema trifásico, simétrico e equilibrado. ....	31
Figura 8 – Sequência CBA de um sistema trifásico, simétrico e equilibrado. ....	32
Figura 9 – Representação de um sistema monofásico.....	36
Figura 10 – (a) Uma configuração de cargas posicionadas sobre um plano infinito; (b) Configuração de cargas e sua imagem, sem o respectivo plano condutor. ....	37
Figura 11 – Termos das matrizes de coeficientes de potenciais de Maxwell aplicados ao método das imagens. ....	40
Figura 12 – Representação de uma linha de transmissão de configuração horizontal. ....	41
Figura 13 – Um sistema físico real monofásico, forma generalizada, ocasião ..... 48	
Figura 14 – Uma representação do Método das Imagens para um sistema monofásico. ....	49
Figura 15 – Uma representação do Método das Imagens para um sistema trifásico.....	50
Figura 16 – Uma representação do Método das Imagens Complexas para um sistema monofásico. ....	51
Figura 17 – Método das Imagens Complexas aplicada a um sistema trifásico. ....	53
Figura 18 – Um sistema trifásico para avaliação do Campo Magnético no ponto P.....	54
Figura 19 – Configuração geométrica da linha de transmissão.....	58
Figura 20 – (a) Um modelo do sistema analisado de campo – (b) Sensor de campo elétrico – (c) Sensor de campo magnético.....	59
Figura 21 – Perfil de campo elétrico resultante a partir do programa desenvolvido para o estudo do sistema representado pela Figura 19. ....	60
Figura 22 – Perfil do campo elétrico obtido pelo autor da referência. ....	60
Figuras 23 – Perfil de campo elétrico para efeito comparativo entre as Figuras 21 e 22.....	61
Figura 24 – Perfil de campo magnético resultante a partir do programa desenvolvido para o estudo do sistema representado pela Figura 19. ....	63
Figura 25 – Perfil de campo magnético obtido por Guimarães (2005). ....	63
Figura 26 – Perfil de campo magnético para comparação.....	64

Figura 27 – Análise de sensibilidade do campo elétrico para os três sistemas sob estudo. ....	66
Figura 28 – Perfis de campos elétricos sob estudo.....	69
Figura 29– Análise de sensibilidade do campo magnético para os três sistemas sob estudo...	70

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Maiores agentes em operação no Brasil.....	23
Quadro 2 - Características geométricas e elétricas do Sistema 1 – Linhas de transmissão trifásica circuito simples de 138 kV. ....	26
Quadro 3 - Características geométricas e elétricas do Sistema 2 – Linha de transmissão trifásica circuito simples 345 kV. ....	27
Quadro 4 - Características geométricas e elétricas do Sistema 3 – Linha de transmissão trifásica circuito simples de 500 kV. ....	28
Quadro 5 - Resumo das características geométricas e elétricas do sistema utilizado por Guimarães (2005). Linha de transmissão Neves 1 – Vespasiano 2.....	58
Quadro 6 - Valores aproximados de campo elétrico para o sistema representado pela Figura 19.....	62
Quadro 7 - Valores de campo magnético para o sistema representado pela Figura 19.....	64
Quadro 8 - Avaliação numérica para o Sistema 1 (138 kV). Verificação dos níveis de campo elétrico obtidos via simulação computacional e os respectivos valores limítrofes, permissíveis por norma, para o público.....	67
Quadro 9 - Avaliação numérica para o Sistema 2 (345 kV). Verificação dos níveis campo elétrico obtidos via simulação computacional e os respectivos valores limítrofes, permissíveis por norma, para o público.....	68
Quadro 10 - Avaliação numérica para o Sistema 3 (500 kV). Verificação dos níveis de campo elétrico obtidos via simulação computacional e os respectivos valores limítrofes permissíveis por norma para o público.....	68
Quadro 11 - Avaliação numérica para o Sistema 1 (138kV). Verificação dos níveis de campo magnético obtidos via simulação computacional e os respectivos valores limítrofes permissíveis, por norma, para o público.....	71
Quadro 12 - Avaliação numérica para o Sistema 2 (345kV). Verificação dos níveis de campo magnético obtidos via simulação computacional, e os respectivos valores limítrofes, permissíveis por norma, para o público. ....	72
Quadro 13 - Avaliação numérica para o Sistema 3 (500kV). Verificação dos níveis de campo magnético obtidos via simulação computacional, e os respectivos valores limítrofes, permissíveis por norma, para o público. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Linhas de transmissão instaladas no Sistema Elétrico Brasileiro.....	24
Tabela 2 – Valores limítrofes de densidade de fluxo magnético para o público geral.....	33
Tabela 3 – Valores limítrofes de densidade de fluxo magnético para exposição ocupacional.....	33
Tabela 4 – Valores limítrofes de campos elétricos para o público em geral. ....	33
Tabela 5 – Valores limítrofes de campos elétricos para exposição ocupacional.....	33

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2 DESCRIÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO SOB ESTUDO</b> .....	22
<b>2.1 Características físicas das linhas de transmissão aéreas</b> .....	25
<b>3 NORMATIZAÇÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	33
<b>3.1 Limiares de exposição humana aos campos eletromagnéticos</b> .....	34
<b>3.2 Aspectos básicos envolvidos no cálculo de campo elétrico</b> .....	36
<b>3.3 Distribuição de cargas nos condutores (<math>\rho_L</math>)</b> .....	38
<b>3.4 Módulo do Campo Elétrico</b> .....	40
3.4.1 Método Aproximado .....	43
<b>3.5 Aspectos básicos envolvidos no cálculo de campo magnético</b> .....	43
3.5.1 Linhas de Transmissão .....	44
3.5.2 Meios onde o sistema sob estudo está inserido (ar e solo) .....	46
<b>3.6 Cálculo dos campos vetoriais Intensidade de Campo Magnético (<math>\vec{H}</math>) e Densidade de Fluxo Magnético (<math>\vec{B}</math>)</b> .....	47
3.6.1 Método das Imagens .....	48
3.6.2 Modelagem do efeito do solo: Método das Imagens complexas.....	50
3.6.3 Equações finais para obter os valores de $\vec{H}$ e $\vec{B}$ .....	52
3.6.4 Método Aproximado .....	55
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	57
<b>4.1 Validação dos resultados</b> .....	57
<b>4.2 Comparação com resultados de medições divulgados na literatura</b> .....	57
4.2.1 Resultados associados à avaliação do campo elétrico .....	59
4.2.2 Resultados associados à avaliação do campo magnético .....	62
<b>4.3 Análises de perfil transversal do campo elétrico e magnético a 1 (um) metro do solo</b> .....	65
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	73
<b>5.1 Propostas de continuidade</b> .....	74
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	75

## 1 INTRODUÇÃO

O acesso à energia elétrica possibilita alavancar o desenvolvimento econômico e também permite melhorar a qualidade de vida das pessoas (MONTICELLI; GARCIA, 2003). Assim, uma forma de transmissão de potência, por exemplo, é por meio de estruturas de guiamento. Tais estruturas servem para orientar, ou simplesmente guiar a propagação da energia a partir da fonte até a carga, sendo então componentes fundamentais do Sistema Elétrico de Potência do Brasil (SADIKU, 2012).

O território brasileiro possui dimensões continentais de grande expressão e, de acordo com Santos (2011) e Vieira (2013), muitas vezes a energia elétrica necessita ser transmitida por longas distâncias. Para que isto seja possível, a tensão de transmissão necessita ser aumentada e, como consequência deste acréscimo, ocorre uma elevação dos níveis de campos eletromagnéticos oriundos de cargas e correntes elétricas contidas nos condutores das linhas de transmissão.

Níveis elevados de campos eletromagnéticos podem possuir potencial suficiente para promover danos a seres biológicos, tais como os humanos, animais ou então objetos situados às margens próximas das linhas de transmissão (SANTOS, 2011).

Devido aos possíveis danos relatados anteriormente, torna-se necessário à determinação de faixas de passagem ou simplesmente de servidão.

Tais distâncias limítrofes devem cobrir ambos os lados das linhas de transmissão e devem seguir ao longo de sua extensão para garantir a segurança quanto à exposição de campos eletromagnéticos.

Na análise quanto à universalização do acesso à energia, cerca de 99,6% da população brasileira tem acesso à energia elétrica, 1,8% a mais que 2011, quando 97,8% dos brasileiros eram beneficiados (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013).

Portanto, para aumentar o número de usuários, o programa do governo federal Luz para Todos, o qual teve início em 2003, foi prorrogado até 2018 a fim de beneficiar mais de um milhão de brasileiros por meio do decreto nº 8.387/2014.

Tais dados percentuais nos remetem à necessidade de construção de linhas de transmissão cada vez menos extensas e construídas próximo aos grandes centros urbanos, acarretando a presença de estruturas que merecem atenção especial, pois as mesmas estarão dentro da faixa de passagem ou servidão da linha de transmissão. De acordo com Gonçalves

e Lopes (2008) essa instalação de estruturas próximo às linhas de transmissão é uma prática cada vez mais utilizada por causa da escassez de terrenos adequados e à busca pela redução de custos. Com o aumento do número de consumidores dos grandes centros urbanos, surge a necessidade de implantação de subestações próximas às áreas habitadas, sendo esta a motivação para o estudo das interferências eletromagnéticas entre as linhas de transmissão e as estruturas afetadas (VIEIRA, 2013).

De um modo geral, a avaliação de campo elétrico e campo magnético são processados em função do regime de operação da linha, ou seja, em regime permanente ou em regime transitório.

Quanto às linhas de transmissão operando em regime permanente, cuja faixa de frequência é de 50 Hz ou 60 Hz, os problemas eletromagnéticos podem ser analisados e calculados de forma independente devido à baixa frequência de operação. Apenas para efeito ilustrativo, os problemas eletromagnéticos observados são divididos em dois fenômenos, (i) acoplamento elétrico (capacitivo e condutivo) e (ii) magnético (indutivo). Para o momento, tais fenômenos não são objeto de estudo deste trabalho. O acoplamento magnético e o acoplamento elétrico foram devidamente abordados por Santos (2011) e Vieira (2013).

As linhas de transmissão em regime transitório (condições de curto circuito, operações de chaveamento, incidência de descargas atmosféricas, dentre outros), o intervalo de frequências são elevadas, variando entre 100 Hz a 1 MHz (LÚCIO, 2012). Neste caso, os efeitos eletromagnéticos deverão ser avaliados na faixa de frequência superior do espectro, o que impossibilita sua análise de forma independente.

De acordo com Santos (2011) e Vieira (2013) o critério de escolha para abordagem da avaliação do campo elétrico e magnético, respectivamente, foi realizado considerando parâmetros onde, os estudos na literatura mostram valores elevados de tensão induzida em elementos dentro da faixa de servidão no estado transitório de operação. A literatura também aponta altos valores de correntes e sobretensões que surgem na linha de transmissão na ocorrência de um evento transitório, entretanto, sua ocorrência possui um tempo relativamente reduzido e são menos frequentes (VIEIRA, 2013).

Em contrapartida, a ocorrência de tensão induzida e demais fenômenos eletromagnéticos são mais comuns e atuam de forma contínua em corpos situados na faixa de passagem das linhas de transmissão.

Diante do exposto, este trabalho busca a compreensão e quantificação do campo elétrico e magnético nas proximidades de uma linha de transmissão operando em regime

permanente e confrontar os resultados obtidos com os valores de acordo com a norma e literaturas base.

Objetiva-se, assim, calcular os níveis de campo elétrico e magnético nas proximidades de uma linha de transmissão operando em regime permanente.

Os objetivos específicos que possibilitarão alcançar, de forma convincente e sólida, são os seguintes:

- a) Modelagem computacional dos níveis de campo elétrico e magnético;
- b) Efeito do solo modelado pelo plano complexo de retorno, de acordo com Deri et al (1981);
- c) Validação dos cálculos por meio de estudos já realizados na área.

Para análise de campo elétrico e magnético nas proximidades de uma linha de transmissão operando em regime permanente, é necessário seguir alguns passos, e seu conjunto corresponde à metodologia adotada o que inclui as seguintes etapas:

- a) Revisão bibliográfica;
- b) Caracterização do sistema sob estudo, onde os objetos em questão serão as linhas de transmissão, e serão adotadas estruturas típicas reais dos sistemas;
- c) Caracterização do comportamento eletromagnético das linhas de transmissão operando em regime permanente;
- d) Modelagem eletromagnética das linhas de transmissão operando em regime permanente;
- e) Uma análise quanto ao efeito do solo, no plano complexo de retorno, se faz necessário, visto que o campo magnético penetra o solo mesmo em baixas frequências, neste caso, uma análise do campo elétrico em baixas frequências (60 Hz) praticamente não penetra no solo (SCHROEDER, 2001);
- f) Desenvolvimento de programas para realização dos cálculos para análise dos níveis de Campos Eletromagnéticos e Campos Elétricos gerados pelas linhas de transmissão;
- g) Validação dos programas desenvolvidos por meio comparativo entre as metodologias e resultados existentes na literatura;
- h) Apresentação dos resultados para sua devida validação será por meio de gráficos e tabelas configurados na mesma escala de medição, o mesmo segue para os resultados obtidos computacionalmente.

O conteúdo deste trabalho segue organizado em cinco capítulos, incluindo este primeiro momento introdutório.

No Capítulo 2, é realizada uma análise descritiva à cerca do sistema sob estudo, em que, neste momento são apresentadas as características específicas das linhas de transmissão, bem como suas características físicas e geométricas, pois são o foco de estudo deste trabalho.

No Capítulo 3, é realizado um estudo do Estado da Arte, em que, inicialmente, faz-se o estudo dos efeitos da exposição biológica de seres humanos aos campos elétricos e magnéticos como coadjuvantes na indução de efeitos biológicos. Posteriormente, é apresentado o aspecto básico acerca do cálculo do campo elétrico, cálculo das densidades lineares de carga, demonstrando a viabilidade de utilizar o Método de Simulação de Cargas. O Método Aproximado também é apresentado, tanto para avaliação do campo elétrico, quanto para a modelagem eletromagnética.

Neste capítulo também são abordados a Lei de Ampère, Método das Imagens, Modelagem do efeito do solo (Método das Imagens Complexas), Método Aproximado (Equações finais para o cálculo de  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$ ) para análise da interferência magnética.

Técnicas de mitigação e demais assuntos relacionados ao acoplamento elétrico e magnético são abordados por Santos (2011) e Vieira (2013), respectivamente.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados e efetuada a respectiva análise dos valores oriundos dos equacionamentos contidos nos *scripts* elaborados computacionalmente. As simulações baseiam-se nos dados apresentados no Capítulo 2. Conforme proposta, no capítulo em questão, uma análise de campo elétrico e magnético nas proximidades das linhas de transmissão é realizada, e sua respectiva validação dos resultados será a partir de valores contidos na norma, encontrados em literaturas, comprovando a consistência da metodologia aplicada.

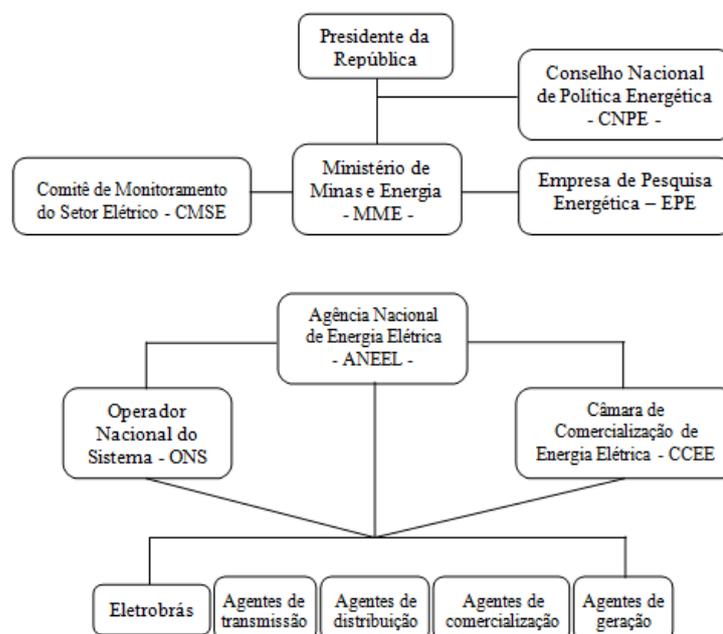
Finalizando o estudo, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais oriundas deste trabalho, bem como, algumas propostas de continuidade deste trabalho.

## 2 DESCRIÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO SOB ESTUDO

O setor elétrico é visto mundialmente estruturado em quatro segmentos bem definidos. Estes são divididos em segmentos como: geração, transmissão, distribuição e comercialização. Vieira (2013) cita em seu trabalho a grande importância para o Sistema Elétrico de Potência – SEP quanto à integração dos sistemas regionais e nacionais, pois possibilita intercambiar a energia entre diversos centros de acordo com a demanda individual, o que viabiliza construir centrais mais eficientes, aumento da reserva energética e melhor comportamento quanto à confiabilidade do sistema onde são solicitados perante situações de distúrbios.

O setor elétrico brasileiro passou por reformas institucionais, as quais ocorreram entre 1995 e 2004. Tais reformas culminam a atual estrutura de funcionamento do setor, para a qual a Figura 1 representa a hierarquia entre os órgãos que gerenciam o setor elétrico brasileiro para atender os requisitos de confiabilidade e segurança da geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica.

Figura 1– Mapeamento organizacional e os agentes do setor elétrico nacional.



Fonte: o autor.

Atualmente, a capacidade total de geração de energia elétrica no Brasil é de aproximadamente 151.710.572 kW de potência instalada, visto que em 2013 a potência

instalada era cerca de 124.334.241 kW podendo quantificar um acréscimo de aproximadamente 22,018% nos últimos 4 anos. Tal valor apresentado refere-se à atual operação de 4.673 empreendimentos que totalizam a potência instalada descrita. São previstos uma adição à potência instalada de aproximadamente 24.722.283 kW que serão provenientes de 239 empreendimentos que estão em fase de construção e mais de 581 empreendimentos com construção prevista para iniciar nos próximos anos (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017).

O Quadro 1 fornece os dados atualizados com os dez maiores agentes de maior capacidade instalada no país (usinas em operação).

Quadro 1– Maiores agentes em operação no Brasil.

<b>Nº</b>	<b>Agentes do Setor</b>	<b>Potência Instalada (kW)</b>
<b>1</b>	Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF	10.613.131,00
<b>2</b>	Furnas Centrais Elétricas S/A. – FURNAS	9.411.200,00
<b>3</b>	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A. – ELETRONORTE	9.222.104,10
<b>4</b>	ENGIE Brasil Energia S/A. – ENGIE	7.323.817,73
<b>5</b>	Itaipu Binacional – ITAIPU	7.000.000,00
<b>6</b>	Petróleo Brasileiro S/A. – PETROBRAS	6.239.224,60
<b>7</b>	CEMIG Geração e Transmissão S/A – CEMIG – GT	5.310.276,80
<b>8</b>	RIO PARANA Energia S/A	4.995.200,00
<b>9</b>	Copel Geração e Transmissão S/A – COPEL – GT	4.921.216,00
<b>10</b>	Energia Sustentável do Brasil S/A – UHE Jirau	3.750.000,00

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2017).

Devido à grande extensão territorial nacional, e por causa das grandes distâncias entre os centros consumidores de energia e as usinas hidrelétricas, o Sistema Nacional de Transmissão de Energia é composto de aproximadamente 135.252 km de linhas instaladas (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017). A Tabela1 representa, em termos globais a quantidade, em quilômetros, das linhas de transmissão no sistema elétrico brasileiro.

Tabela 1– Linhas de transmissão instaladas no Sistema Elétrico Brasileiro.

Classe de Tensão (kV)	Linhas de Transmissão Instaladas (km)	Total (%)
230	55.873	41,3
345	10.319	7,6
440	6.748	5,0
500	46.813	34,6
600 (CC)	12.816	9,5
750	2.683	2,0
Total SEB	135.252	100,0

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2017).

Tendo em vista a vasta extensão territorial nacional e o aumento de linhas de transmissão próximas aos centros urbanos, utiliza-se para o estudo deste trabalho configurações reais existentes atualmente, para análise de campo elétrico e magnético nas proximidades de uma linha de transmissão operando em regime permanente e posterior verificação de valores de acordo com a norma pertinente.

Existe uma grande dependência em função das características físicas de uma linha de transmissão para que seu desempenho seja aceitável. Desta forma, os parâmetros elétricos serão definidos, uma vez que tais características determinam o seu comportamento em regime normal de operação. Quanto ao comportamento de uma linha de transmissão, podemos classificar em duas partes, sendo uma componente ativa e outra componente passiva.

Cabos condutores, responsáveis por transportar a energia elétrica, compõem a parte ativa. Nos dias de hoje não é conhecido nenhum tipo de material que atenda os requisitos de um elemento condutor ideal, porém para serem classificados como ideais, os mesmos devem apresentar as seguintes características: alta condutibilidade elétrica, baixo custo, boa resistência mecânica, baixa peso específico e alta resistência à oxidação e a corrosão por agentes químicos poluentes (VIEIRA, 2013).

Compõem a parte passiva de uma linha de transmissão os isoladores, ferragens e estruturas. Sua função é garantir a existência de uma distância entre os condutores do solo e entre eles mesmos. Devem possuir resistência suficiente para suportar tanto agentes mecânicos quanto elétricos. Também fazem parte deste grupo os cabos pára-raios e aterramentos.

O número de circuitos (um ou dois circuitos), disposição dos condutores (triangular, vertical e horizontal), função da cadeia de isolador (suspensão, ancoragem e ângulo), tensão da linha, formato (tronco piramidal de circuito simples e duplo, delta e estaiada), resistência mecânica das estruturas, menor impacto ambiental, adequação aos aspectos de segurança relativos aos níveis de campos eletromagnéticos gerados, rádio interferência e nível de ruído, indicarão as dimensões e formas das torres de transmissão (FUCHS, 1977).

Quanto ao levantamento do traçado. Segundo Vieira (2013) e Pires (2005), esta é uma etapa fundamental, a qual deve-se verificar os seguintes dados: perfil do terreno e solo, cadastro de propriedades, reservas ambientais, obstáculos no percurso, dentre outros fatores, que são importantes para a viabilização do empreendimento.

A fim de garantir um melhor desempenho da linha de transmissão aérea e, também a segurança, são determinadas faixas de passagem/servidão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985).

- a) Linhas de transmissão de 345 a 500 kV: possuem uma faixa de servidão de 30 (trinta) metros, sendo 15 metros para cada lado contados a partir do eixo da torre;
- b) Linhas de transmissão de 34,5; 69; 88 e 138 kV: faixa de passagem mínima de 20 metros, sendo 10 metros para cada lado.

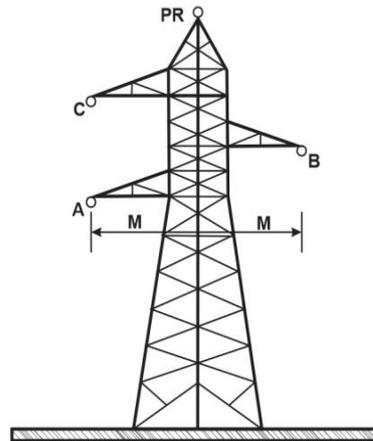
Logo, para que uma linha de transmissão seja projetada, os seguintes aspectos deverão ser avaliados: minimização da quantidade de torres, espaçamento uniforme entre as torres, evitar torres em terrenos acidentados, úmido ou com erosão, garantir uma distância mínima dos cabos condutores em relação ao solo, evitar paralelismo entre a linha de transmissão e linhas férreas, cercas de arame e gasodutos.

## **2.1 Características físicas das linhas de transmissão aéreas**

Tem-se como objetivo utilizar configurações reais de algumas linhas de transmissão da CEMIG. A seguir são apresentadas com detalhes suas respectivas configurações (silhuetas) mais utilizadas no percurso em questão e suas características geométricas e elétricas da linha de transmissão são mostradas nas tabelas. Apenas para questões de organização, os modelos de Linhas de Transmissão apresentados neste trabalho serão organizados em sistemas e seus respectivos parâmetros.

O Sistema 1 refere-se à Linha de Transmissão Janaúba – Salinas com parâmetro elétrico de 138 kV. A silhueta mais utilizada no percurso da linha é ilustrada pela Figura 2.

Figura 2– Silhueta da torre do Sistema 1–Linhas de Transmissão de 138 kV.



Fonte: (VIEIRA, 2013, p. 14).

O Quadro 2 fornece dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores.

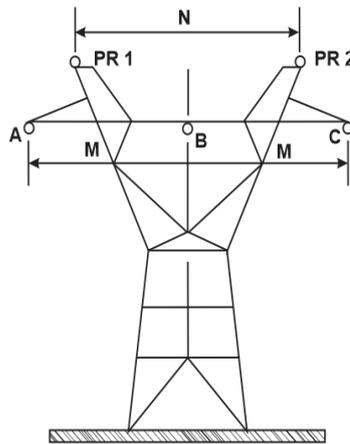
Quadro 2– Características geométricas e elétricas do Sistema 1 – Linhas de transmissão trifásica circuito simples de 138 kV.

<b>Características geométricas e elétricas do Sistema 1</b>	
Tensão de operação	138 kV
Potência máxima transmitida	35 MVA
Corrente de operação média	146,43 A
Comprimento da linha	140 km
Nº de condutores/fase	1
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
Diâmetro cabos fase	18,31 mm
Vão médio	400 m
M	3,0 m

Fonte: Adaptado de Vieira (2013).

O Sistema 2 refere-se a Linha de Transmissão Pimenta-Barbacena com parâmetro elétrico de 345 kV. A silhueta mais utilizada no percurso da linha é ilustrada pela Figura 3.

Figura 3– Silhueta da torre do Sistema 2– Linhas de transmissão de 345 kV.



Fonte: (VIEIRA, 2013, p. 15).

O Quadro 3 fornece os dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores.

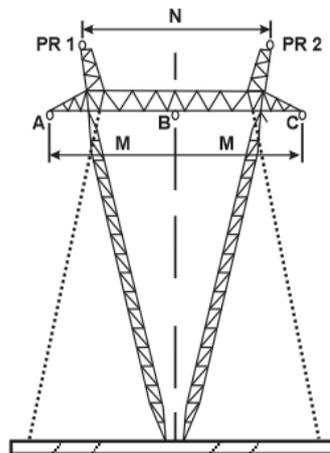
Quadro 3– Características geométricas e elétricas do Sistema 2 – Linha de transmissão trifásica circuito simples 345 kV.

<b>Características geométricas e elétricas do 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
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
Diâmetro cabo fase	29,59 mm
Vão médio	413 m
M	9,5 m
N	6,85 m

Fonte: Adaptado de Vieira (2013).

O Sistema 3 refere-se à Linha de Transmissão São Gonçalo – Ouro Preto com parâmetro elétrico de 500 kV. A silhueta mais utilizada no percurso da linha é ilustrada pela Figura 4.

Figura 4– Silhueta da torre do Sistema 3 – Linha de transmissão de 500 kV.



Fonte: (VIEIRA, 2013, p. 16).

O Quadro 4 fornece os dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores.

Quadro 4– Características geométricas e elétricas do Sistema 3 – Linha de transmissão trifásica circuitos simples de 500 kV.

<b>Características geométricas e elétricas do Sistema 3</b>	
Tensão de operação	500 kV
Capacidade de transmissão	725 MVA
Corrente de operação média	837,15 A
Comprimento da linha	120,31 km
Nº de condutores/fase	3
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
Diâmetro cabo fase	28,74 mm
Vão médio	468,13 m
M	10,25 m
N	7,25 m

Fonte: Adaptado de Vieira (2013).

Algumas observações sobre as configurações geométricas e características elétricas dos sistemas 1, 2 e 3 apresentados anteriormente são:

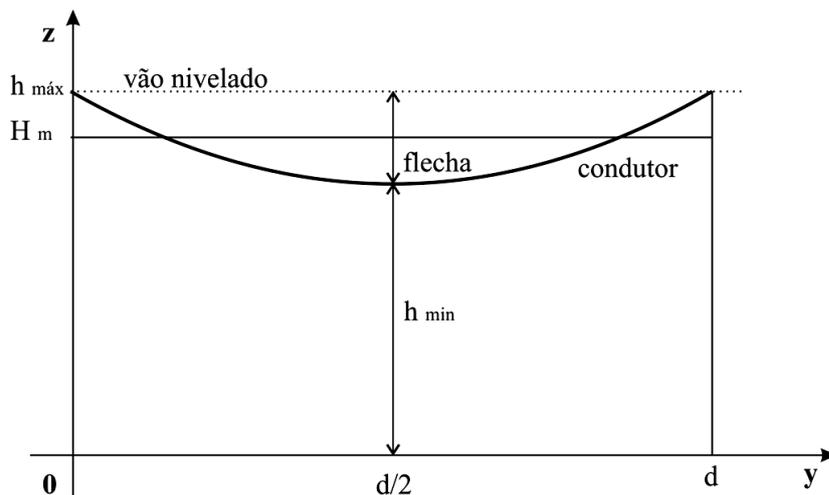
Pode-se calcular a altura média dos condutores de uma linha de transmissão em relação ao solo a partir da respectiva Equação (1):

$$H_m = h_{m\acute{a}x} - \frac{2}{3}F \quad (1)$$

Onde  $h_{m\acute{a}x}$  é a altura máxima do condutor na torre,  $F$  é a flecha<sup>1</sup>, (VIEIRA, 2013).

A altura média dos condutores da linha de transmissão em relação ao solo esta relacionada com o cálculo da flecha. A Figura 5 ilustra tais informações citadas anteriormente.

Figura 5– Elementos relativos à altura média.



Fonte: o autor.

A expressão matemática (2) permite obter o valor relativo à flecha ( $F$ ):

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

Onde  $p$  é o peso do cabo, medido em [kgf/m],  $A_e$  é o vão nivelado, estimado em metros e  $T_0$  é a tração em que o cabo está sendo submetido, medido em kgf. Para linhas de transmissão constituídas por múltiplos subcondutores, disposto em forma de feixe, utiliza-se

<sup>1</sup>É relativo à distância ortogonal do ponto mínimo da catenária ao vão nivelado.

o método do Raio Médio Geométrico (RMG)<sup>2</sup>. Para situações onde temos dois, três e quatro subcondutores o RMG é obtido a partir das Equações (3), (4) e (5) respectivamente.

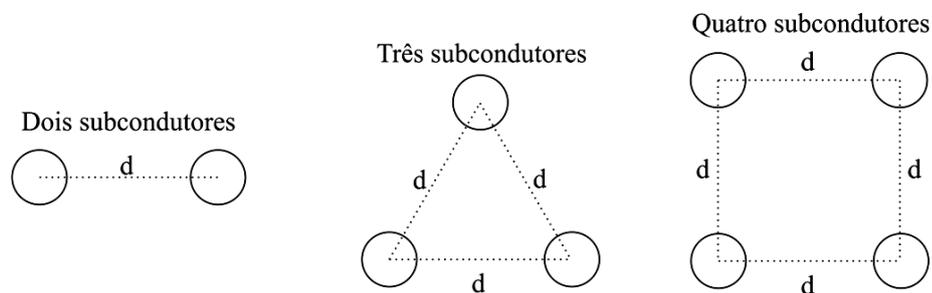
$$\text{RMG} = \sqrt{D_s d} \quad (3)$$

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

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

Onde RMG é o raio médio geométrico do condutor equivalente,  $D_s$  é o RMG dos condutores individuais – cada tipo de cabo possui uma tabela específica – e “d” é a distância entre os subcondutores. A Figura 6 ilustra um esquemático quando a disposição de cabos múltiplos para dois, três e quatro subcondutores.

Figura 6– Cabos com múltiplos condutores.

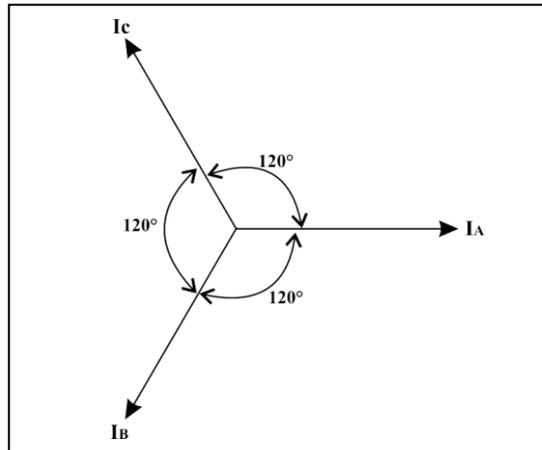


Fonte: (VIEIRA, 2013, p. 18).

Para o cálculo dos valores das correntes nas fases, considera-se o sistema simétrico e equilibrado, ou seja, sequência de fase ABC, conforme ilustra a Figura 7.

<sup>2</sup> Pressupõe que o condutor relativo ao feixe (múltiplos subcondutores) está a uma altura igual ao centro da circunferência do mesmo.

Figura 7– Sequência ABC de um sistema trifásico, simétrico e equilibrado.



Fonte: o autor.

Desta forma, calcula-se a corrente  $I$ , conforme a Equação (6).

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

Onde  $S_{3\phi}$  é a potência aparente trifásica e  $V$  é a tensão entre fase da linha de transmissão. O defasamento entre as correntes nas fases A, B e C é determinado a partir dos equacionamentos (7.a), (7.b) e (7.c) .

$$I_a = I\angle 0^\circ \quad (7.a)$$

$$I_b = I\angle -120^\circ \quad (7.b)$$

$$I_c = I\angle 120^\circ \quad (7.c)$$

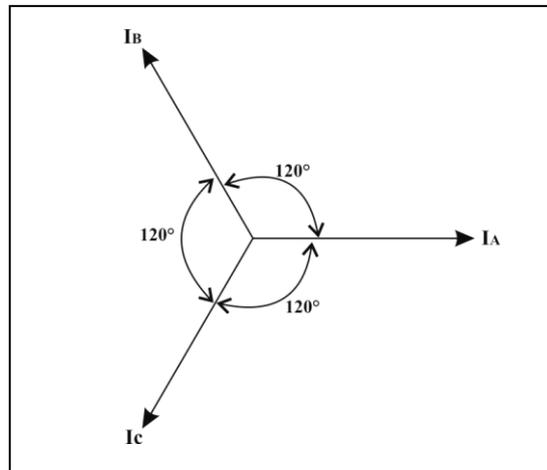
Para uma sequência CBA o valor das correntes das fases pode ser obtido através das expressões (8.a), (8.b) e (8.c). A Figura 8 ilustra um sistema trifásico, simétrico e equilibrado.

$$I_a = I \angle 0^\circ \quad (8.a)$$

$$I_b = I \angle 120^\circ \quad (8.b)$$

$$I_c = I \angle -120^\circ \quad (8.c)$$

Figura 8 – Sequência CBA de um sistema trifásico, simétrico e equilibrado.



Fonte: o autor.

### 3 NORMATIZAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A preocupação com os possíveis efeitos da exposição humana a campos elétricos e magnéticos permitiu às diversas entidades envolvidas neste assunto, avaliar detalhadamente possíveis produtos desta interação, o que resultou em normas e diversas publicações entre a comunidade científica para determinar os limites de exposição (ABRICEM, 1999).

As tabelas a seguir apresentam um resumo dos principais valores limítrofes quanto à exposição a campos elétricos e magnéticos.

Tabela 2– Valores limítrofes de densidade de fluxo magnético para o público geral.

Parâmetro <sup>3</sup>	ICNIRP	NBR5422	NBR15415	IEEE C95.6
Densidade de Fluxo Magnético ( $\mu\text{T}$ )	83,3	83,3	83,3	904

Fonte: Adaptado de Vieira (2013).

Tabela 3– Valores limítrofes de densidade de fluxo magnético para exposição ocupacional.

Parâmetro	ICNIRP	NBR5422	NBR15415	IEEE C95.6
Densidade de Fluxo Magnético ( $\mu\text{T}$ )	416,6	416,6	–	2.712

Fonte: Adaptado de Vieira (2013).

Tabela 4– Valores limítrofes de campos elétricos para o público em geral.

Parâmetro	ICNIRP	NBR 5422	NBR 15415	IRPA <sup>4</sup>
Campo elétrico (kV/m)	4,17	5	4,17	5

Fonte: Adaptado de Santos (2011).

Tabela 5– Valores limítrofes de campos elétricos para exposição ocupacional.

Parâmetro	ICNIRP	NBR 5422	NBR 15415	IRPA
Campo elétrico (kV/m)	8,3	8,3	–	10

Fonte: O autor.

<sup>3</sup> Frequência de operação da rede relativo às tabelas 2 ao 5 : 60Hz.

<sup>4</sup> Limites de exposição estabelecidos pela “*International Radiation Protection Association – IRPA*” (TEIXEIRA,2001) – Tabelas 4 e 5.

### 3.1 Limiares de exposição humana aos campos eletromagnéticos

Os efeitos nocivos à saúde humana são assuntos que impulsionam estudos científicos para analisar os efeitos da interação deste tipo de radiação com a matéria, pois, ao ponto em que a demanda de energia elétrica se expande, torna-se necessário investimento para ampliação do setor elétrico brasileiro.

Vieira (2013) cita em seu trabalho uma solução tecnicamente viável para que seja possível atender tal demanda em que, a construção de linhas de transmissão operando em tensões mais elevadas possibilitaria aumentar o fluxo de potência ativa nas referidas linhas, a fim de reduzir as perdas ôhmicas. A partir de tais ampliações será possível viabilizar: o atendimento a demandados sistemas de transmissão, distribuição e a presença de novas unidades de subestação serão mais comuns em áreas habitadas.

Assim, o objetivo deste capítulo é demonstrar normas pertinentes a proteção quanto à exposição às radiações não ionizantes, análise e seus referidos detrimientos devido à exposição ao campo eletromagnético incidente sobre os seres vivos.

Instrumentos de medição para detecção e quantificação do campo magnético, serão utilizados para avaliação dos níveis de campo magnético que interagem com os seres vivos. Tais equipamentos dosimétricos são fixados junto ao corpo das pessoas que serão observadas por determinado intervalo de tempo para quantificar o nível de campo magnético que a mesma está exposta, em função das variadas fontes de campos magnéticos (VIEIRA, 2013).

De acordo com as diretrizes da “*International Commission on Non-Ionizing Radiation*” (ICNIRP) para limitar a exposição humana aos campos elétricos e magnéticos “*fact sheet on the guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields*” quando as pessoas são expostas à campos de baixa frequência (1 Hz – 100 kHz), campos elétricos e correntes são criadas no interior de seus corpos, podendo interagir com seus respectivos campos elétricos e fluxos de corrente vitais para a fisiologia intrínseca normal deste indivíduo. Tal interação, caso ocorra em níveis baixos, serão imperceptíveis ao corpo e não comprometerá sua fisiologia.

A ICNIRP adverte que exposições acima de determinados limiares, provocarão efeitos reversíveis nas células que foram excitadas no corpo humano. Tais efeitos podem ser:

- a) Efeitos de carga elétrica ao nível tecidual (eletrização de pelos dos membros periféricos, por exemplo);
- b) Estimulação de nervos e músculos causando uma sensação de formigamento;

- c) Efeitos cardiovasculares irreversíveis ou queimaduras de tecidos também são observados em níveis mais elevados.

Efeitos tardios também são objetos de estudos nas últimas décadas. Tais como:

- a) Campos magnéticos de 50–60 Hz podem estar relacionados ao aumento da ocorrência de leucemia infantil. Em contrapartida, estudos laboratoriais não evidenciaram fatores que possibilitaram concluir que a exposição a longo prazo é uma das causas de leucemia infantil;
- b) Provas científicas são inexistentes para fatores conclusivos que possam associar a exposição aos campos magnéticos à doença de Parkinson<sup>5</sup> e também à esclerose múltipla<sup>6</sup>;
- c) Estudos de sintomas, tais como: a qualidade do sono, funções cognitivas também não favorecem evidenciar nenhum destes efeitos para este tipo de exposição.
- d) De acordo com uma pesquisa global, a ICNIRP não encontrou informações conclusivas de que a exposição de baixo nível aos campos eletromagnéticos a longo prazo possuem caráter danoso à saúde.

Em documento disponibilizado pela ICNIRP, os efeitos de campos estáticos no corpo humano e suas implicações para a saúde informam que a exposição a campos magnéticos estáticos afetará as partículas e células eletricamente carregadas que constituem o sangue, reduzindo a velocidade das mesmas que circulam através dos vasos e por meio de interações ao nível eletrônico podem afetar a taxa de reações químicas que ocorrem no corpo humano.

Não existem registros de efeitos adversos relativos às exposições a campos até 8 Teslas, exceto para ocorrências nas quais foram observadas efeitos menores, como, por exemplo, a coordenação mão–olho e o contraste visual.

Para uma variação entre 2 a 3 Teslas ou mais, sensações de vertigem e náuseas podem ser observadas. O agente causador destes efeitos é o resultado da geração de sinais ao cérebro oriundo de pequenas correntes elétricas, que fornecem informações diferentes das obtidas por meio da visão. A ICNIRP, ainda em seu documento, informa que campos elétricos estáticos são incapazes de penetrarem no corpo humano, porém interagem indiretamente, conforme descrito anteriormente. Os campos elétricos, cuja intensidade é elevada, podem carregar partículas poluentes no ar. Assim, existe uma hipótese de que tais partículas podem ser

---

<sup>5</sup> “Doença degenerativa do sistema nervoso central – SNC [...]. É causada por uma diminuição intensa da dopamina, que é um neurotransmissor (substância química que auxilia na transmissão de mensagens entre as células nervosas.” (NEUROLOGIA...,2017, p. 1).

<sup>6</sup> “Doença que compromete o SNC, formado por cérebro, cerebelo, tronco encefálico e medula espinhal. É uma doença desmielinizante, ou seja, as células imunológicas invertem sua função, que é de protegerem o sistema de defesa, passando a agredi-lo, produzindo inflamações na mesma.” (NEUROLOGIA..., 2017, p. 1).

encontradas em suspensão no ar e, ao serem inaladas pelos seres humanos, são absorvidas pelo pulmão, aumentando a exposição de pessoas à poluição do ar.

### 3.2 Aspectos básicos envolvidos no cálculo de campo elétrico

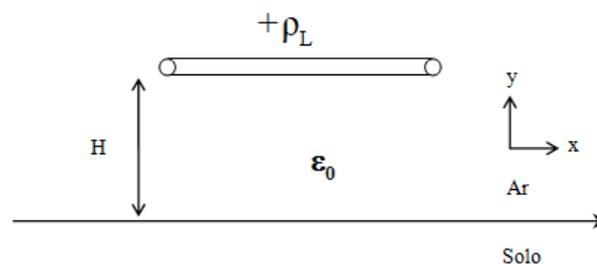
Um produto gerado a partir da operação de linhas de transmissão, em 60 Hz, e a presença de campos elétricos em suas proximidades devemos observar a existência de dois tipos de cálculos para quantificar os níveis de campos elétricos para o desenvolvimento de projetos de linhas de transmissão.

O primeiro item a ser observado é o cálculo do campo elétrico na superfície dos condutores. Ele está associado às perdas por efeito corona<sup>7</sup>, de ruídos perceptíveis a audição e aos níveis de interferência.

Perdas por efeito corona implicam economicamente para as concessionárias e ao meio ambiente, desta forma, faz-se necessário um estudo específico a esse respeito, onde Santos (2011) cita em seu trabalho diversas obras utilizadas para referenciar seu estudo acadêmico. Logo, campos elétricos superficiais não é escopo deste trabalho.

Para garantir segurança aos seres humanos, que estarão localizados nas proximidades das linhas de transmissão, o cálculo do campo elétrico ao nível do solo é de grande importância a fim de demonstrar matematicamente que os limites máximos estabelecidos para essa grandeza serão respeitados. Desta forma, para calcular os níveis de campos elétricos ao nível do solo, torna-se necessário o conhecimento geométrico da linha de transmissão em estudo e de sua respectiva distribuição de carga na superfície dos condutores, associada à tensão de operação desta linha. A Figura 9 representa um sistema composto por uma linha monofásica, situada a uma determinada altura  $H$ , relativa ao solo e o sistema imerso no ar.

Figura 9– Representação de um sistema monofásico.



Fonte: o autor.

<sup>7</sup> “O efeito corona ocorre quando o valor do gradiente de potencial na superfície dos condutores excede o valor do gradiente crítico disruptivo do ar.” (SANTOS, 2011, p. 28).

Seja o sistema representado pela Figura 9 linear, homogêneo, isotrópico e não dispersivo, é possível obter o valor do campo elétrico em um ponto (P) qualquer, localizado na região entre os condutores e o solo, a partir da Equação (9) que é obtida via manipulações da terceira equação de Maxwell (Lei de Gauss).

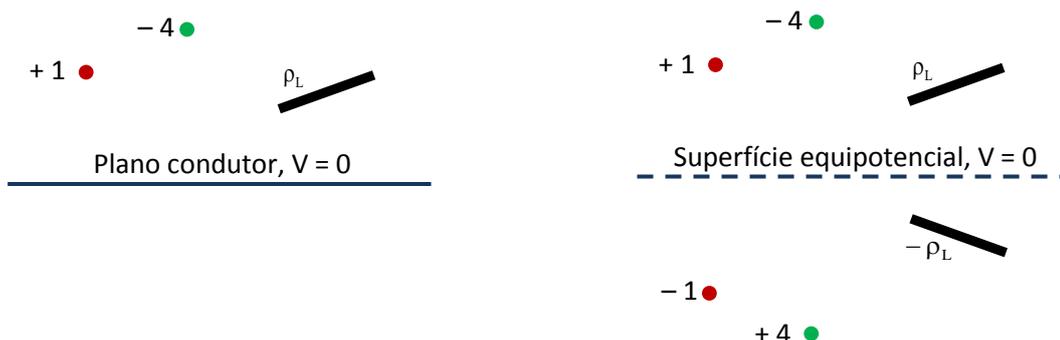
$$\vec{E} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0\rho} \hat{a}_\rho \quad (9)$$

Onde  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo ( $\approx ar$ ) e vale ( $=8,854 \times 10^{-12} F/m$ ),  $\rho_L$  é a densidade linear de carga distribuída na superfície dos condutores e é medida em (C/m),  $\hat{a}_\rho$  é o vetor unitário que fornece a direção e o sentido ao campo elétrico e  $\rho$  é a distância vertical entre a distribuição de carga e o referido ponto (P). Cálculos dos níveis de campos elétricos criados pelas linhas de transmissão também são aplicados utilizando o Método das Imagens (MI) e o Teorema da Superposição.

Para aplicação do Método das Imagens, Buck e Hayt (2013) dizem que existe uma característica importante relativo ao plano infinito de potencial zero existente entre as duas cargas. Um plano condutor extremamente fino e infinito em sua extensão pode substituir este plano infinito de potencial zero. Desta forma, o condutor é uma superfície equipotencial, no potencial  $V=0$ , e a intensidade de campo elétrico é normal à superfície.

Considera-se o solo como um condutor elétrico perfeito e, assumindo este formato, sua condutividade tenderá ao infinito. Para estimarmos os níveis de campo elétrico, cargas imagens são posicionadas às distâncias relativas entre os meios que os separam, cuja densidade linear de carga é definida com valor oposto. As Figuras 10a e 10b representam a aplicação do Método das Imagens.

Figura 10–(a) Uma configuração de cargas posicionadas sobre um plano infinito; (b) Configuração de cargas e sua imagem, sem o respectivo plano condutor.



Fonte: (BUCK; HAYT, 2013, p. 125).

Desta forma, embasados nos teoremas expostos anteriormente, a expressão para estimar o campo elétrico (Equação 9) pode ser expandida e assume o formato conforme a Equação 10, a seguir:

$$\vec{E} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0\rho_R} \hat{a}_{\rho R} - \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0\rho_I} \hat{a}_{\rho I} \quad (10)$$

Na Equação (10), tem-se que:

$\rho_R$  é a distância entre o ponto de referência e a respectiva projeção vertical deste no condutor real;  $\rho_I$  é a distância entre o ponto de referência e a respectiva projeção vertical deste, no condutor imagem;  $\hat{a}_{\rho R}$  vetor unitário relativo ao condutor real que irá definir a direção e o sentido do vetor campo elétrico;  $\hat{a}_{\rho I}$  vetor unitário relativo ao condutor imagem que irá definir a direção e o sentido do vetor campo elétrico.

Para um sistema trifásico, por ser tratado como um sistema linear, o campo elétrico resultante poderá ser obtido a partir da soma das parcelas oriundas das distribuições de carga e suas respectivas imagens, de acordo com o teorema da superposição.

Considerando a metodologia aplicada pelos autores e, tendo em vista que a geometria do sistema é conhecida, por meio da Equação 10, é importante observar que, para obter níveis de campo elétrico gerados por linhas de transmissão, é necessário conhecimento das distribuições de cargas nas superfícies dos condutores, denotado por ( $\rho_L$ ).

### 3.3 Distribuição de cargas nos condutores ( $\rho_L$ )

Para estimar os níveis de campo elétrico gerados por linhas de transmissão operando em regime permanente, cada elemento condutor é considerado sendo um fasor de tensão [V], possuindo componente real e imaginária. A distribuição de carga, por unidade de comprimento ( $\rho_L$ ), pode ser obtida via método analítico ou por meio de métodos numéricos. Conhecer o valor das cargas elétricas em cada um dos elementos condutores da linha de transmissão é o ponto inicial para o cálculo dos níveis de campos elétricos (SANTOS, 2011).

Sistemas físicos de natureza simplificada permitem obter o valor das cargas nos condutores utilizando a solução analítica. Entretanto, os sistemas físicos são muito complexos inviabilizando sua aplicação.

Assim, para tais casos, métodos numéricos são aplicados para o cálculo das cargas nos condutores, logo, permitindo estimar os níveis de campo elétrico. Dentre os métodos numéricos existentes, destacam-se os Métodos das Diferenças Finitas, Método de Monte Carlo, Método dos Momentos, Método de Simulação de Cargas (MSC) e o Método de Simulação de Carga de Superfície.

O MSC é uma das técnicas mais utilizadas para obter as distribuições de cargas por envolver uma quantidade reduzida de equações lineares demandando um custo computacional menor ao ser comparado com os demais métodos.

O MSC baseia-se na substituição das distribuições de cargas contínuas reais sobre a superfície dos condutores por um conjunto de distribuição de cargas fictícias (SANTOS, 2011). Matematicamente, podemos expressá-lo por meio da Equação (11).

$$[\rho_L] = [P]^{-1} [V] \quad (11)$$

Onde, cada termo da Equação (11) possui o seguinte significado:

[V] vetor tensão que corresponde aos fasores de tensão dos condutores do sistema em estudo (V);

[P] matriz de coeficientes de potenciais de Maxwell (m/F);

$[P]^{-1}$  é a matriz de capacitância do sistema (F/m);

$[\rho_L]$  vetor de fasores de densidades lineares de carga em todos os condutores do sistema (C/m).

O resultado obtido solucionando a Equação (11) permite obter a densidade linear de carga, possibilitando estimar o campo elétrico criado pela linha de transmissão em estudo.

Os respectivos termos da matriz de coeficientes de potenciais de Maxwell [P] são determinados a partir de  $P_{ii}$  e  $P_{ij}$  exemplificado por meio das Equações (12.a) e (12.b):

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad (12.a)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'_{ij}}{d_{ij}}\right) \quad (12.b)$$

Os termos das matrizes são definidos como:

$\epsilon_0$  – permissividade do ar e vale  $8,85 \times 10^{-12}$  F/m;

$h_i$  – referida altura do condutor “i” em relação ao solo (m);

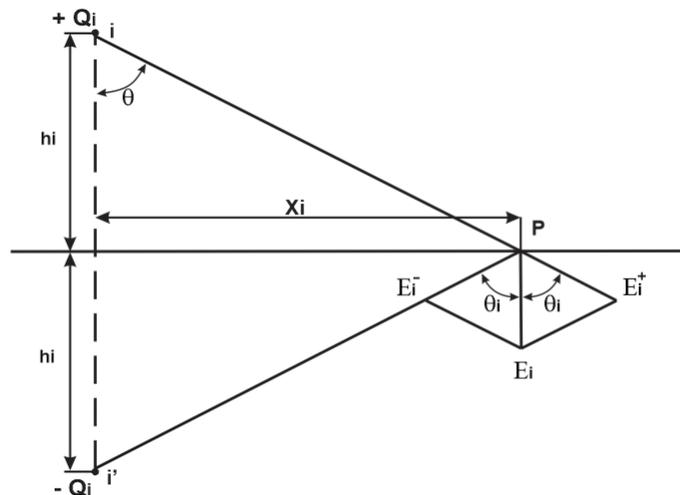
$r_i$  – raio do condutor “i” (m);

$d_{ij}$  – é a distância entre o condutor “i” e o condutor “j” (m);

$d'_{ij}$  – distância entre o condutor “i” e a imagem do condutor “j” (m);

A Figura 11 representa a aplicação do método das imagens, ou seja, é a posição dos termos elementares das matrizes apresentadas acima.

Figura 11– Termos das matrizes de coeficientes de potenciais de Maxwell aplicados ao método das imagens.



Fonte: o autor.

### 3.4 Módulo do Campo Elétrico

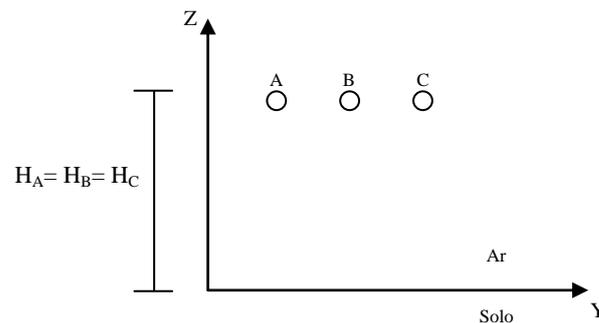
Podemos expressar o campo elétrico criado pelas distribuições de cargas nas linhas de transmissão monofásica ou trifásica operando em regime permanente, tanto no domínio do tempo, quanto no domínio fasorial. Devido à linearidade do sistema, temos que a frequência do campo elétrico é a mesma das distribuições de cargas elétricas e as tensões dos condutores, ou seja, 60 Hz.

A representação no domínio do tempo e fasorial possuem três grandezas características: frequência, amplitude e defasagem angular. As mesmas diferem entre si da seguinte maneira: no domínio do tempo, as componentes do campo elétrico correspondem às

funções senoidais vetoriais, enquanto no domínio fasorial existem fasores–vetores (SANTOS, 2011).

Considere a Figura 12 cuja representação refere–se a um sistema composto por uma linha de transmissão trifásica de configuração horizontal, suas fases são A, B e C, considerando um sistema sem perdas de generalidade.

Figura 12 – Representação de uma linha de transmissão de configuração horizontal.



Fonte: o autor.

Santos (2011) evidencia alguns detalhes: (i) os raios das fases A, B e C são muito menores ao serem comparados com seus respectivos comprimentos condutores e (ii) as referidas distâncias entre as fontes, ou seja, observando as distribuições lineares de carga nas respectivas fases A, B e C, e o ponto onde o campo elétrico é estimado são muito menores ao serem comparados com os comprimentos dos condutores. A presença das torres e das cadeias de componentes isoladores não é considerada, assim, o cálculo poderá ser considerado analisando apenas duas dimensões. Consideramos os seguintes fatos:

- A Figura 12 representa uma visão do plano y–z em relação ao eixo longitudinal situado no eixo “x” da linha de transmissão;
- O plano x–y corresponde ao sistema ar–solo, onde  $z = 0$ ;
- O campo elétrico gerado pela linha de transmissão pode ser obtido em um ponto genérico do espaço, para  $z > 0$ , possui componentes na direção y–z e pode ser representada matematicamente, de acordo com a Equação (13).

$$\vec{E} = E_Y(t)\hat{a}_Y + E_Z(t)\hat{a}_Z \quad (13)$$

Na Equação (13), tem–se que,  $\hat{a}_Y$  e  $\hat{a}_Z$  são os vetores unitários ao longo dos eixos y e z;

$E_Y(t) = E_Y \cos(\omega t + \phi_Y)$ ,  $E_Z(t) = E_Z \cos(\omega t + \phi_Z)$  são as componentes senoidais do campo elétrico no tempo.

Pode-se obter o campo elétrico total escrevendo as funções das componentes nos eixos y e z, conforme representado pelas Equações (14a) e (14b).

$$E_Y(t) = E_Y [\cos(\omega t) \cos(\phi_Y) - \sin(\omega t) \sin(\phi_Y)] \quad (14.a)$$

$$E_Z(t) = E_Z [\cos(\omega t) \cos(\phi_Z) - \sin(\omega t) \sin(\phi_Z)] \quad (14.b)$$

Os termos  $E_Y$  e  $E_Z$  das expressões matemáticas (14.a) e (14.b) representam as amplitudes das componentes do campo elétrico no plano y e z, e  $\phi_Y$  e  $\phi_Z$  são os ângulos de fase no tempo de seus respectivos eixos.

O campo elétrico também pode ser representado no domínio dos fasores, conforme informado anteriormente. As Equações (15.a) e (15.b) representam matematicamente suas componentes.

$$E_{SY} = E_Y e^{j\phi_Y} = E_Y \angle \phi_Y \quad (15.a)$$

$$E_{SZ} = E_Z e^{j\phi_Z} = E_Z \angle \phi_Z \quad (15.b)$$

Nas Equações (15.a) e (15.b) tem-se que:

$$j = \sqrt{-1};$$

$E_{SY} = E_Y \cos(\phi_Y) + jE_Y \sin(\phi_Y)$  é correspondente ao fasor campo elétrico no plano y; onde

$E_{RY} = E_Y \cos(\phi_Y)$  a sua componente real e  $E_{iY} = E_Y \sin(\phi_Y)$  sua componente imaginária.

Assim, temos a Equação (16):

$$\vec{E}_S = E_{SY} \hat{a}_Y + E_{SZ} \hat{a}_Z \quad (16)$$

Na Equação (16)  $\vec{E}_S$  (o subscrito “s” representa o domínio fasorial) é o fasor-vetor do campo elétrico  $\vec{E}$ .

O computo do módulo do vetor campo elétrico descrito até o momento pode ser estimado de duas maneiras, utilizando-se o método das elipses e o método aproximado.

Porém, para estimar os níveis de campo elétrico para o presente trabalho será utilizado apenas o método aproximado que será descrito a seguir. O método das elipses é detalhado em Santos (2011).

### 3.4.1 Método Aproximado

A Equação (17), a seguir, permite obter o módulo do fasor-vetor campo elétrico ( $E_s$ ), representado pela Equação (16) no tópico anterior.

$$E_{MÁX} = E_s = \sqrt{E_{SY}^2 + E_{SZ}^2} \quad (17)$$

As Equações (18.a) e (18.b), permitem obter os módulos de  $E_{SY}$  e  $E_{SZ}$ , respectivamente:

$$E_{SY} = \sqrt{E_{RY}^2 + E_{iY}^2} \quad (18.a)$$

$$E_{SZ} = \sqrt{E_{RZ}^2 + E_{iZ}^2} \quad (18.b)$$

### 3.5 Aspectos básicos envolvidos no cálculo de campo magnético

É de grande importância salientar que aspectos que envolvem acoplamento elétrico e magnético, os quais são tratados detalhadamente em Santos (2011) e Vieira (2013), por isso, este trabalho possui enfoque na avaliação dos níveis de campo elétrico e magnético nas proximidades das linhas de transmissão citadas no Capítulo 2 operando em regime permanente e, posteriormente, a obtenção de tais valores, verificar se estão dentro dos limiares permitidos pela norma vigente.

Os aspectos básicos envolvidos para os cálculos devem respeitar algumas premissas e limites de validade. Assim, julga-se oportuno apresentá-los, pois os mesmos irão nortear todo equacionamento para que seja possível a avaliação dos níveis de campo eletromagnético.

De acordo com Vieira (2013) os parâmetros são, para o objetivo deste trabalho, conforme os itens 3.5.1 e 3.5.2, ambos a seguir.

### 3.5.1 Linhas de Transmissão

Quanto aos sistemas sob estudo, é oportuno descrever parâmetros de grande valia para o presente momento:

- a) Características globais: Sistema trifásico<sup>8</sup> balanceado<sup>9</sup> ou desbalanceado, aéreo, simétrico<sup>10</sup> e uniforme<sup>11</sup>;
- b) Regime de operacional: senoidal, regime permanente cuja frequência é de 60 Hz;
- c) Tensões aplicadas aos condutores fase da linha de transmissão: Possuem mesma amplitude e seu defasamento é de 120° no tempo. Sequência de fase é positiva, ou seja, possuem a fase A como referência em sua sequência ABC, onde é evidenciado devido ao estado permanente senoidal e, desta forma, não existe sequência negativa ou sequência zero;
- d) Níveis de corrente nos condutores fase: É fundamental ter conhecimento das correntes que circulam pelos condutores fase, detalhes quanto ao seu módulo e ângulo de defasagem para o cálculo de campo elétrico e campo magnético, enquanto temos conhecimento preciso da tensão de linha, sem grandes variações ao longo do tempo, ocorre uma variação considerável dos valores de corrente que circulam pelos condutores das linhas de transmissão. Isto se dá a partir da demanda de energia elétrica. Tendo em vista tais variações instantâneas da corrente, os respectivos valores de campo elétrico e campo magnético também serão variáveis com o transcorrer do tempo, portanto, as correntes que circulam nos cabos fase são obtidas em função da potência nominal da L.T, a Equação (19) representa a forma para se calcular à corrente de linha:

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3}V_L \cos \phi} \quad (19)$$

<sup>8</sup> Possui três tensões senoidais e distribuídas em três fases A, B e C.

<sup>9</sup> Apresentam simetrias entre impedâncias próprias dos cabos fase e impedâncias mútuas entre os cabos fase.

<sup>10</sup> Constituído pelos mesmos valores máximos de tensão por fase. Possuem um defasamento angular, por fase, de 120° no tempo.

<sup>11</sup> A relação fasorial de tensão e corrente são as mesmas em qualquer que seja o ponto ao longo da linha de transmissão. Desta forma, existe uma independência em sua respectiva impedância característica em função de seu comprimento.

Na Equação (19) tem-se que  $I_L$  e  $V_L$  são, respectivamente, as amplitudes de corrente e tensão de linha;  $S$  é a potência complexa nominal da linha de transmissão e  $\cos \phi$  é o fator de potência da linha;

- e) Distribuições de corrente (distância entre fontes) e do campo magnético (ponto de observação): Pelo menos de 10 metros a 20 metros. Permitindo, desconsiderar seus respectivos raios, passando a assumir um formato filamentar;
- f) Distância entre todos os condutores que constituem o sistema em questão: São consideravelmente maiores que seus raios. Em virtude desta equivalência, os efeitos de proximidade entre os condutores podem ser desprezados. Assim, as correntes podem ser consideradas como sendo uma distribuição linear e uniforme ao longo de seus respectivos condutores. Outra observação importante, pertinente a esta aproximação, é o reconhecimento da constituição física de cada condutor. Cada elemento condutor é composto por feixes múltiplos. Desta forma, o conceito de raio médio geométrico é válido, descrito no Capítulo 2 (seção 2.1, subseção 2.2.3), Equações (3) a (5);
- g) Catenária dos condutores da linha: Conforme representado pela (Figura 5) é a altura média dos condutores da linha de transmissão em relação ao solo e definido matematicamente pela Equação (1). Definindo certo paralelismo em relação aos condutores e ao solo;
- h) Comprimento dos condutores: São muito maiores ao serem comparados com as distâncias entre as fontes e o ponto de observação do campo eletromagnético. Seu comprimento pode ser considerado infinito. A lei de Ampère possui melhor aplicabilidade para o cálculo de campo magnético em relação a lei de Biot–Savart<sup>12</sup>;
- i) Torres e cadeias de isoladores: Não provocam distorção no campo magnético. O cálculo é realizado em relação ao plano normal ao eixo longitudinal da linha de transmissão. Desta forma, não possui componente ao longo do eixo desprezado;
- j) Cabos para-raios: Não é objeto de estudo para este trabalho. São tratados por Santos (2011) e Vieira (2013);
- k) Cabos compostos por fios encordoados e com alma de aço: A corrente na alma de aço é desconsiderada e a representação do condutor é tubular com seção transversal reta, tendo formato geométrico semelhante a uma coroa circular.

---

<sup>12</sup> SADIKU (2012) informa que a lei de Biot–Savart, grandes físicos franceses, estabeleceram que “a intensidade de campo magnético  $dH$  criada em um determinado ponto  $P$ , pelo elemento diferencial de corrente  $I dl$  é proporcional ao produto entre  $I dl$  e o seno do ângulo, entre o elemento e a linha, que une o ponto  $P$  ao elemento, sendo inversamente proporcional ao quadrado da distância  $R$  entre  $P$  e o elemento”, ou seja,

$$dH \propto \frac{I dl \sin \alpha}{R^2} .$$

### 3.5.2 Meios onde o sistema sob estudo está inserido (ar e solo)

Além dos condutores da linha de transmissão, o sistema observado contém apenas dois meios “semi–infinitos”, o ar e o solo.

- a) Quanto às características eletromagnéticas a cerca de sua condutividade, permissividade e permeabilidade: São considerados homogêneos, lineares, isotrópicos e suas propriedades eletromagnéticas não variam em função da posição, intensidade e orientação do campo submetido;
- b) Existência de cargas elétricas livres: O meio “ar–solo” não é constituído de cargas livres no meio em questão;
- c) Meio de separação. Sistema constituente por “ar–solo”: É considerado plano e paralelo aos respectivos condutores de L.T.;
- d) Efeito do solo no cálculo do campo magnético e no retorno de corrente: Vieira (2013) comenta quanto à existência de outras metodologias para a modelagem do efeito do solo e, cita em seu trabalho autores como J. R. Carson, M. Nakagawa, T. Noda e outros. Assim, é oportuno referenciá-los neste trabalho. Tais autores citados, de acordo com a referência bibliográfica base utilizada para elaboração deste trabalho de conclusão de curso, informa que os resultados oriundos da aplicação destas variadas metodologias geraram praticamente os mesmos resultados. Assim, optou–se por adotar a modelagem de acordo com Deri et al (1981), devido ao fato de se constituída por formulações de fácil inserção / implementação em *script* computacional, objetivo fundamental deste trabalho;
- e) Modelagem do solo de acordo com Deri et al (1981): Em diversos estudos o solo é considerado um condutor elétrico perfeito, ou seja, ( $\sigma_s \rightarrow \infty$ ). Seu efeito pode ser obtido via método das imagens ideais. Uma abordagem mais específica para o solo é considerar que sua condutividade é infinita, ou seja, ( $\sigma_s \neq \infty$ ) e a permissividade do meio diferente em relação à do vácuo ( $\epsilon_s \neq \epsilon_0$ ) e permeabilidade igual a do vácuo ( $\mu_s \neq \mu_0$ ). Entretanto, quando é trabalhado com baixas frequências, considera–se ( $\epsilon_s = \epsilon_0$ ). A proposta é realizar a concepção de um plano complexo de retorno de corrente pelo solo, aplicando o método das imagens, que neste caso passa a ser denominado como o método das imagens complexas Vieira (2013). Este plano é constituído por condutividade infinita e está posicionado a uma determinada profundidade “p” complexa, dependente de parâmetros como: frequência e dados eletromagnéticos do solo;

f) Estratificação do solo: O solo é parametrizado com um meio homogêneo, ou seja, independente da camada cuja resistividade é proporcional, não é considerado seus valores.

### 3.6 Cálculo dos campos vetoriais Intensidade de Campo Magnético ( $\vec{H}$ ) e Densidade de Fluxo Magnético ( $\vec{B}$ )

A Lei de Ampère para fenômenos quase estáticos, representado pela Equação (20) estabelece que, a integral de linha da componente ( $\vec{H}$ ) que tangencia um caminho fechado é igual à corrente envolvida no sistema (caminho)  $I_{env}$  e que possui natureza condutiva. Desta forma, fica explícito a necessidade de conhecermos o valor das correntes nos condutores fase. Vale salientar que na equação a seguir,  $I_c$  é denominada corrente elétrica nos condutores da linha (VIEIRA, 2013).

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_c \equiv \int_L \vec{H} \cdot d\vec{L} = \int_S \vec{J}_c \cdot d\vec{S} = I_c \quad (20)$$

A Equação (21) demonstra de forma simplificada a Equação (20) aplicada a um condutor filamental, cujo comprimento é infinito.

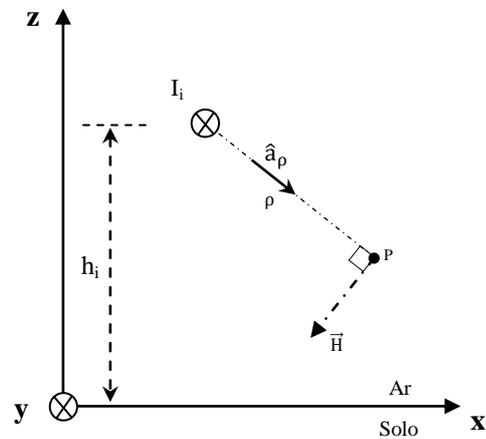
$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi\rho} \hat{a}_\phi \quad (21)$$

Onde,  $I$  é a corrente que propaga pela L.T.;  $\rho$  é o ponto de observação na linha e o ponto de observação do campo magnético;  $\hat{a}_\phi$  é o vetor unitário que referencia a direção e o sentido do campo magnético relativo ao ponto de observação, obtido a partir da Equação (22).

$$\hat{a}_\phi = \hat{a}_L \times \hat{a}_p \quad (22)$$

O vetor unitário  $\hat{a}_L$  define a direção e o sentido da corrente elétrica ao longo do condutor;  $\hat{a}_p$  é o vetor unitário que irá caracterizar a direção e o sentido do vetor, sua origem é correspondente ao ponto (P) em que o campo magnético é observado (VIEIRA, 2013). Para ilustrar o que foi exposto anteriormente, vide a Figura (13) a seguir:

Figura 13– Um sistema físico real monofásico, forma generalizada, ocasião em que a Lei de Ampère é aplicada para determinação do Campo Magnético  $\vec{H}$  no ponto P.



Fonte: o autor.

Vieira (2013) utiliza em sua dissertação a representação literária “y” para denotar a linha de transmissão ao longo do eixo y, o meio “ar” é adotado para  $z > 0$  e “solo” para  $z < 0$  e, a representação do perfil transversal de campo magnético ao longo do eixo x.

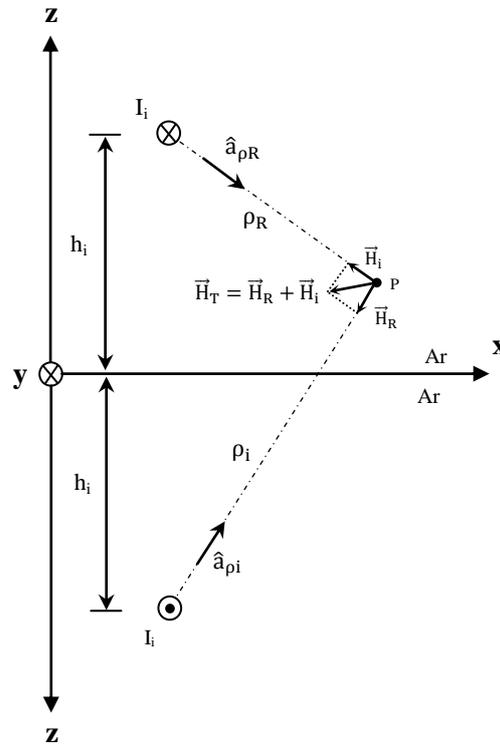
O mesmo informa que a Equação (21) possui limite de validade. A mesma é válida apenas para o cálculo do campo magnético gerado por uma Linha de Transmissão imersa em um meio único. Reporta também a necessidade de inclusão de dois meios para expressão do campo magnético, de acordo com a Figura (13) apresentada anteriormente. Esta inclusão será realizada via aplicação do Método das Imagens. É oportuno recordar que este método também é aplicado para obtenção dos níveis de campo elétrico, descrito neste Capítulo 3 (seção 3.2).

### 3.6.1 Método das Imagens

No campo da magnetostática este método é utilizado para representar as correntes que penetram no solo e, influenciam quanto à estimativa dos valores do campo magnético no referido ponto de observação. A teoria para aplicação do Método das Imagens possui mesmo o mesmo conceito descrito neste Capítulo 3 (seção 3.2).

A Figura (14) representa a aplicação do Método das Imagens para posicionar a fonte de corrente imagem e, demonstra a obtenção do vetor intensidade de campo magnético total, denotado por  $(\vec{H}_T)$ .

Figura 14– Uma representação do Método das Imagens para um sistema monofásico.



Fonte: o autor.

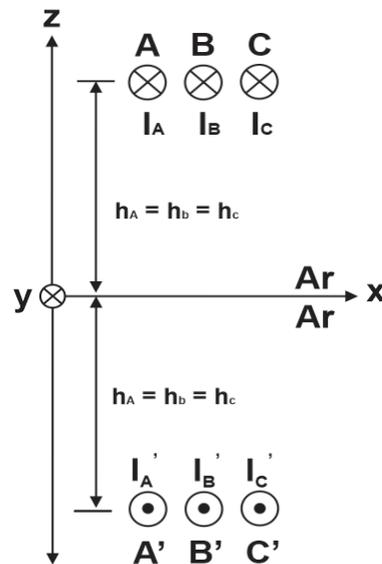
O campo magnético total é obtido a partir das Equações (23.a) e (23.b). Assim, verifica-se que o Campo Magnético total é obtido a partir da soma das parcelas geradas pelas correntes reais (constituintes pela linha de transmissão) e pelas respectivas imagens.

$$\vec{H}_T = \vec{H}_R + \vec{H}_i \quad (23.a)$$

$$\vec{H}_T = \frac{I}{2\pi\rho_R} \hat{a}_{\rho_R} + \frac{I}{2\pi\rho_i} \hat{a}_{\rho_i} \quad (23.b)$$

Pode-se expandir a Equação (23b) para situações em que existe uma linha de transmissão trifásica. A Figura (15) ilustra tal configuração.

Figura 15 – Uma representação do Método das Imagens para um sistema trifásico.



Fonte: Adaptado de Vieira (2013).

Até o momento o solo é modelado como um condutor elétrico perfeito, desta forma, o campo magnético criado pelas correntes nos cabos fase não transfixam no solo (VIEIRA, 2013). A seguir, o efeito do solo com condutividade classificada como finita é incluída junto à expressão matemática para obtenção do campo magnético. Conforme Deri et al (1981) esta inclusão é feita por meio conceitual pertinente ao plano de retorno complexo.

### 3.6.2 Modelagem do efeito do solo: Método das Imagens complexas

Os campos magnéticos presentes devido à circulação de corrente elétrica nos condutores de uma determinada linha de transmissão, além de sofrerem modificação proveniente da interação com o solo, penetram no mesmo. Este efeito deverá ser incluído na modelagem eletromagnética, pois deveremos ter conhecimento da profundidade de penetração deste campo magnético junto ao solo. O método em questão consiste na consideração de um plano complexo de condutividade infinita de retorno de corrente, localizado logo abaixo do solo, cuja distância é igual à profundidade de penetração complexa, denotada por “p”. A Equação (24) representa o cálculo da profundidade complexa.

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_s + j\omega\epsilon_s)}} \quad (24)$$



Analisando a Figura (16) conclui-se que a expressão matemática final para o cálculo do campo magnético total é possível com a alteração apenas das distâncias entre o ponto de observação e os pontos de fonte proveniente da inclusão da profundidade complexa “p” (VIEIRA, 2013). Portanto, a Equação (26) permite obter o valor do campo magnético.

$$\vec{H}_T = \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi\rho_R^2} (h_p - h_i, 0, x_i - x_p) + \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi\rho_i^2} (-h_p - h_i - 2p, 0, x_p - x_i) \quad (26)$$

### 3.6.3 Equações finais para obter os valores de $\vec{H}$ e $\vec{B}$

Tanto o campo magnético  $\vec{H}$ , quanto o fluxo magnético  $\vec{B}$  criado pelas correntes que circulam nas linhas de transmissão, sendo ela monofásica ou trifásica, em regime permanente, é possível ser expresso no domínio do tempo ou então, no domínio dos fasores. Assim, para que seja possível representá-los em ambos os domínios, é necessário o conhecimento de três parâmetros, são eles: frequência, amplitude e defasamento angular. Estas grandezas diferem-se no domínio do tempo de forma que os componentes do campo magnético  $\vec{H}$  são funções cossenoidais vetorial e, no domínio dos fasores, eles assumem o formato de fasores-vetores.

A Equação (27) relaciona  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$  em função do meio que os mesmos estão inseridos:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (27)$$

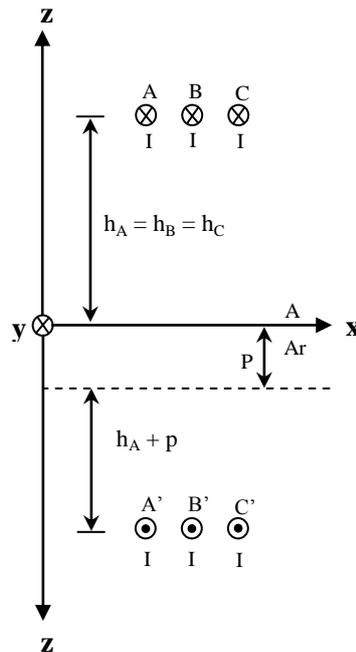
Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e, seu valor é  $4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$  e, a definição para o vetor densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$  tem-se como sendo a força magnética por unidade de elemento de corrente, cuja unidade de medida em webers por metro quadrado ( $\text{Wb/m}^2$ ) ou de acordo com o Sistema Internacional de Unidade, o tesla<sup>13</sup> (T) e  $\vec{H}$  é medido em ampères por metro (BUCK; HAYT, 2013).

O sistema representado pela Figura (17) ilustra um sistema trifásico horizontal, sob a influência do solo, onde é modelado pelo método das imagens complexas (DERI et al, 1981). Este modelo será a base para a formulação geral para o cálculo do campo magnético.

<sup>13</sup> No passado era utilizada a unidade de medida Gauss (G) para a densidade de fluxo elétrico, na qual 1 T ou 1  $\text{Wb/m}^2$  é equivalente a 10.000 G (BUCK; HAYT, 2013).

É oportuno informar que Vieira (2013) considerou para seu estudo este mesmo sistema trifásico, porém com a presença de dois cabos para-raios.

Figura 17 – Método das Imagens Complexas aplicada a um sistema trifásico.



Fonte: o autor.

Aplicando a Lei de Ampère, obtemos o valor do campo magnético total no ponto genérico P e notamos a influência de cada cabo fase. É possível estimar o valor do campo magnético total de acordo com a Equação (28) a seguir:

$$\vec{H}_T = \frac{I_i}{2\pi\rho_R} \hat{a}_{\phi R} + \frac{I_i}{2\pi\rho_I} \hat{a}_{\phi I} \quad (28)$$

Onde o valor de  $\hat{a}_{\phi R}$  e  $\hat{a}_{\phi I}$  é obtido a partir do produto vetorial da seguinte forma:

$$\hat{a}_{\phi R} = \hat{a}_L \times \hat{a}_{\rho R} \quad \text{e} \quad \hat{a}_{\phi I} = \hat{a}_L \times \hat{a}_{\rho I}$$

A partir da Figura (18) podem-se definir os valores para  $\rho_R$  e  $\rho_I$ . Assim, encontramos também os valores unitários para os vetores  $\hat{a}_{\rho R}$  e  $\hat{a}_{\rho I}$  de acordo com as Equações (29) a (34).

$$\vec{\rho}_R = \{(x_p - x_i), 0, (z_p - h_i)\} \quad (29)$$

$$\rho_R = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (z_p - h_i)^2} \quad (30)$$

$$\hat{a}_{\rho R} = \frac{(x_p - x_i), 0, (z_p - h_i)}{\rho_R} \quad (31)$$

$$\vec{\rho}_I = \{(x_p - x_i), 0, (z_p + h_i + 2p)\} \quad (32)$$

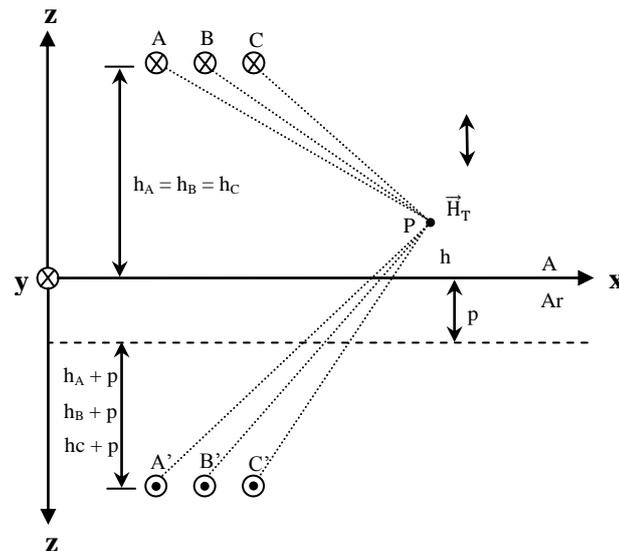
$$\rho_I = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (z_p + h_i + 2p)^2} \quad (33)$$

$$\hat{a}_{\rho I} = \frac{(x_p - x_i), 0, (z_p + h_i + 2p)}{\rho_I} \quad (34)$$

Os vetores que apontam do elemento de corrente real e imagem para o ponto de observação do campo magnético são  $\vec{\rho}_R$  e  $\vec{\rho}_I$ .

Os módulos dos vetores são obtidos por  $\vec{\rho}_R$  e  $\vec{\rho}_I$ ; Os vetores unitários, real e imagem, dos elementos de corrente são respectivamente,  $\hat{a}_{\rho R}$  e  $\hat{a}_{\rho I}$ ; Os termos  $x_p, x_i, z_p$  e  $h_i$  são, respectivamente, a posição “x” relativo ao ponto de observação, a posição “x” do elemento de corrente, a referida altura do ponto de observação e a altura do elemento de corrente.

Figura 18– Um sistema trifásico para avaliação do Campo Magnético no ponto P.



Fonte: o autor.

De acordo com a Equação (35) podemos obter o campo magnético para um determinado ponto de observação a uma determinada altura ( $z_p$ ), onde ocorre uma singularidade entre as Equações (29) a (34) aplicados à Equação (28).

$$\vec{H}_T = \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi} \left[ \frac{(h_p - h_i), 0, (x_i - x_p)}{[(x_p - x_i)^2 + (h_p - h_i)^2]} \right] + \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi} \left[ \frac{(-h_p - h_i - 2p), 0, x_p - x_i}{[(x_p - x_i)^2 + (h_p + h_i + 2p)^2]} \right] \quad (35)$$

Vieira (2013) finaliza a seção informando que a expressão citada acima, Equação (35) é a formulação final completa para obtenção do campo magnético aplicada individualmente para cada condutor que constitui o sistema trifásico em questão. Desta forma, ao realizar o somatório para estimar o valor do campo no ponto genérico P, podemos aplicar a Equação (36) a seguir:

$$\vec{H}_T = \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi} \left[ \frac{(h_p - h_i), 0, (x_i - x_p)}{[(x_p - x_i)^2 + (h_p - h_i)^2]} \right] + \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi} \left[ \frac{(-h_p - h_i - 2p), 0, x_p - x_i}{[(x_p - x_i)^2 + (h_p + h_i + 2p)^2]} \right] \quad (36)$$

Para determinarmos o valor da Densidade de Fluxo Magnético Total  $\vec{B}_T$ , aplicamos a Equação (37) a seguir:

$$\vec{B}_T = \mu_0 \vec{H}_T \quad (37)$$

### 3.6.4 Método Aproximado

Este método para obtenção do valor total de campo magnético considera apenas os módulos finais das componentes “x” e “z” dos vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$ .

Um produto relacionado à modelagem do solo pelo plano complexo proposto por Deri et al (1981), são os valores adicionais de  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$  assumindo uma forma de números complexos, tendo então, uma componente real e uma parte imaginária, para as componentes ao longo dos eixos “x” e “z”. A Equação (38) e (39) representa o que foi informado anteriormente:

$$\vec{H}_{TX} = [H_{TRX} + jH_{TIX}] \hat{a}_X = H_X \angle \theta_X \hat{a}_X \quad (38)$$

$$\vec{H}_{TZ} = [H_{TRZ} + jH_{TIZ}] \hat{a}_Z = H_Z \angle \theta_Z \hat{a}_Z \quad (39)$$

Onde  $H_{TRX} + jH_{TIX}$  referem-se ao campo magnético criado pelas correntes reais e sua respectiva imagem ao longo do eixo “x” e,  $H_{TRZ} + jH_{TIZ}$  é o campo magnético presente devido às correntes reais e imagens ao longo do eixo “z”.

Os módulos das componentes totais pertinentes aos eixos “x” e “z” são obtidos a partir das Equações (40) e (41), a seguir:

$$H_{TX(MAX)} = \sqrt{(H_{TRX})^2 + (H_{TIX})^2} \quad (40)$$

$$H_{TZ(MAX)} = \sqrt{(H_{TRZ})^2 + (H_{TIZ})^2} \quad (41)$$

Assim, para o cálculo dos campos  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$  resultantes, aplica-se as Equações (42) e (43). Tais equações definem o Método Aproximado descrito neste tópico.

$$H_{T(MAX)} = \sqrt{(H_{TX(MAX)})^2 + (H_{TZ(MAX)})^2} \quad (42)$$

$$B_{T(MAX)} = \mu_0 H_{T(MAX)} [T] \quad (43)$$

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

No capítulo 2, deste trabalho, são apresentados os parâmetros das três configurações reais de linhas de transmissão. Após detalhamento das geometrias e dados elétricos das linhas sob estudo, são descritos no capítulo 3 as metodologias aplicadas para os cálculos de campo elétrico e magnético. Também informados os valores limítrofes para exposição às radiações tanto para o indivíduo do público, quanto para os ocupacionalmente expostos, possibilitando elaborar uma sequência computacional no *Matlab*® viabilizando os cálculos de interesse.

Nas subseções seguintes, são apresentados os gráficos oriundos desta sequência de cálculos realizados pelo programa supracitado, os quais permitem uma série de análises de sensibilidade de interesse prático.

### 4.1 Validação dos resultados

A validação de resultados é uma etapa de grande importância em qualquer tipo de estudo, pois os dados obtidos necessitam ser verificados quanto a sua confiabilidade. Diante do exposto, foram obedecidos os seguintes critérios para a validação do programa:

- a) Comparação com os resultados de medições (*in loco*) de campos elétrico e magnético divulgados na literatura;
- b) Comparação com os resultados computacionais divulgados na literatura;
- c) Posteriormente, tais dados obtidos são comparados com os valores de referência descritos nas Tabelas 2 a 5, possibilitando então, julgar se os valores de níveis de campo estão dentro dos valores limítrofes de segurança.

### 4.2 Comparações com resultados de medições divulgados na literatura

Conforme descrito no item anterior, é importante realizar testes de caráter comparativo para validação dos dados obtidos via simulação computacional. Guimarães (2005) realiza diversas medições (*in loco*) para obtenção dos níveis de campo elétrico e magnético de uma linha de transmissão de 500 kV, cujos parâmetros estão descritos no Quadro 5. Desta forma, tais dados serão utilizados para validação do programa desenvolvido neste trabalho.

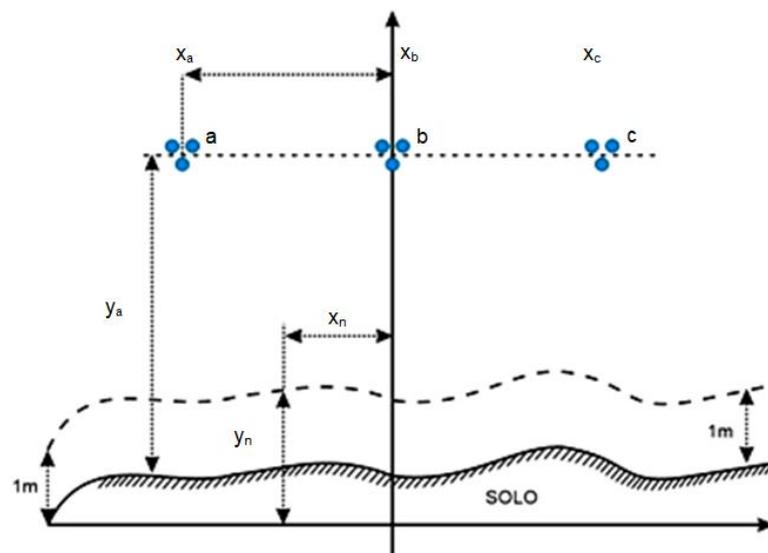
Quadro 5- Resumo das características geométricas e elétricas do sistema utilizado por Guimarães (2005). Linha de transmissão Neves 1 – Vespasiano 2.

Características geométricas e elétricas do sistema	
Tensão de operação	500 kV
Corrente de operação média	650 A
Nº de condutores/fase	3
Distância entre subcondutores	0,457 m
Diâmetro cabo fase	28,74 mm

Fonte: o autor.

A linha de transmissão utilizada pelo autor é do tipo horizontal, trifásico e circuito simples, conforme ilustrado pela Figura 19. A distância entre as fases A e C é de 12 (doze) metros e a fase B é definida como o eixo de simetria. As alturas das fases em relação ao solo variam devido à assimetria do relevo onde está localizada a linha de transmissão. A distância máxima de cada fase alcança o valor de 25,26 m e um valor mínimo de 10,86 m em relação ao solo. A resistividade do solo aplicada para simulação é de  $2400 \Omega \cdot m$ , pois é o valor médio relativo a todo o estado de Minas Gerais (LÚCIO, 2012).

Figura 19– Configuração geométrica da linha de transmissão.

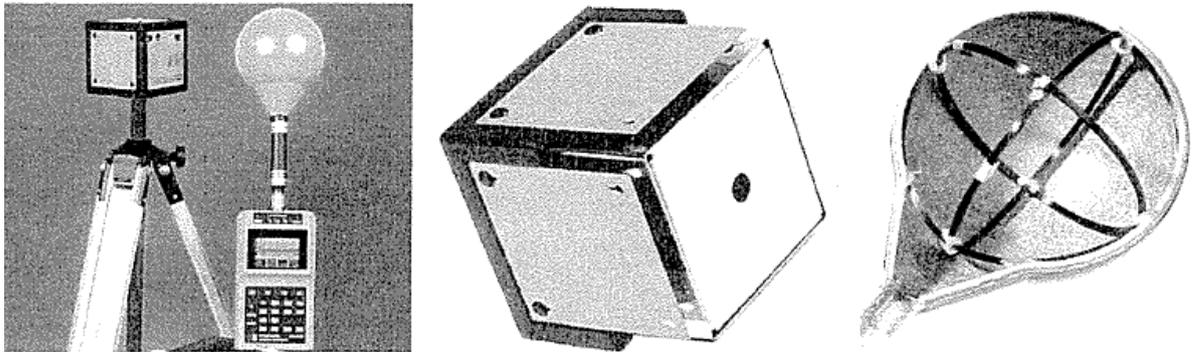


Fonte: (GUIMARÃES, 2005, p. 45).

As medidas dos valores, tanto para campo elétrico, quanto para campo magnético, foram realizadas em um perfil de seção transversal de 40 (quarenta) metros para cada lado a partir do eixo de simetria e avaliado seus respectivos campos a 1 (um) metro de altura em relação ao solo. Desta forma, os gráficos apresentados estão configurados na mesma escala utilizada pelo autor de referência.

Guimarães (2005) utilizou sensores de campo elétrico e magnético e um sistema analisador de campo para tratar os dados e armazená-los. Já para quantificar os níveis de campo magnético, o autor utilizou um sensor com três bobinas dispostas ortogonalmente, e para medir os níveis de campo elétrico, foi utilizado um sensor formado por um cubo composto por três pares de placas dispostas paralelamente com arranjo ortogonal, possibilitando medir o campo nas três direções do espaço. As Figuras 20-a, 20-b e 20-c ilustram o equipamento utilizado.

Figura 20– (a) Um modelo do sistema analisado de campo – (b) Sensor de campo elétrico – (c) Sensor de campo magnético.



Fonte: (GUIMARÃES, 2005, p. 40).

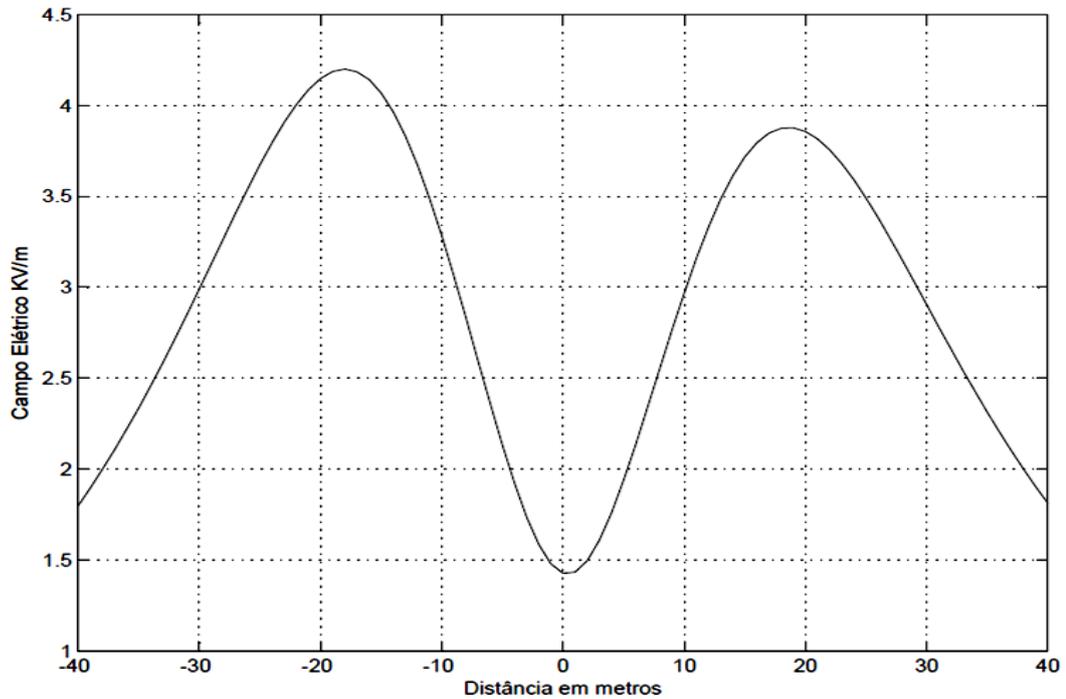
O equipamento utilizado possui filtros que permitem quantificar os níveis dos campos em uma faixa entre 5 Hz e 32 kHz. A faixa selecionada para a avaliação foi de 60 Hz. O erro típico é menor do que  $3\% \pm 1$  nT para a densidade de fluxo magnético.

#### 4.2.1 Resultados associados à avaliação do campo elétrico

As Figuras 21 e 22 ilustram os resultados obtidos a partir do programa elaborado para este trabalho e os valores das medições divulgadas na literatura consideradas para validação dos resultados quanto à avaliação dos níveis de campo elétrico para o sistema representado

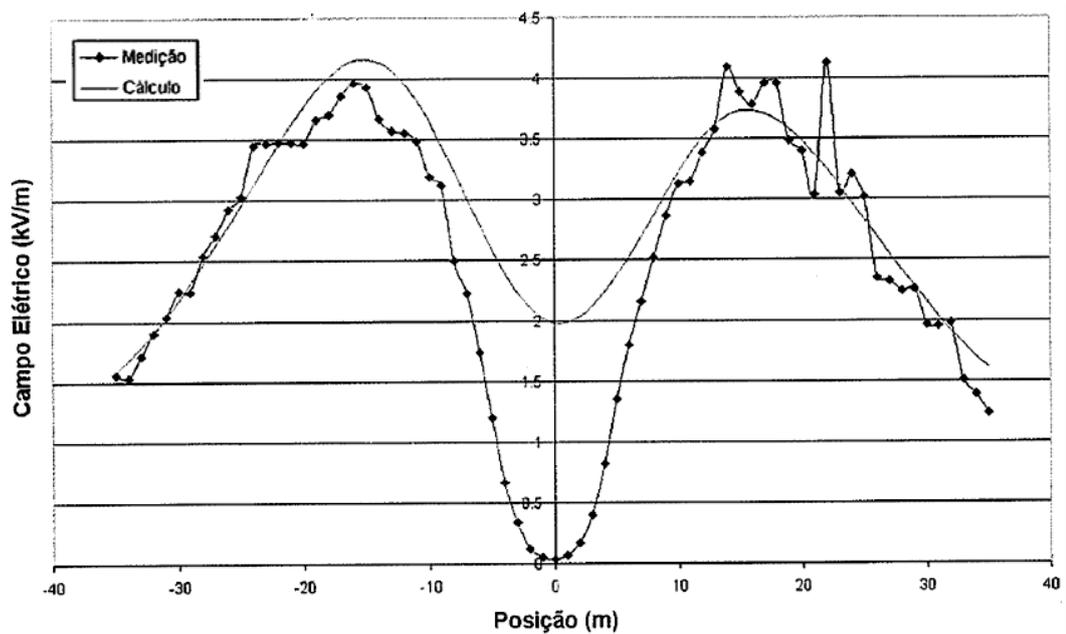
pela Figura 19. Posteriormente é realizada uma comparação entre os valores obtidos por Santos (2011).

Figura 21– Perfil de campo elétrico resultante a partir do programa desenvolvido para o estudo do sistema representado pela Figura 19.



Fonte: o autor.

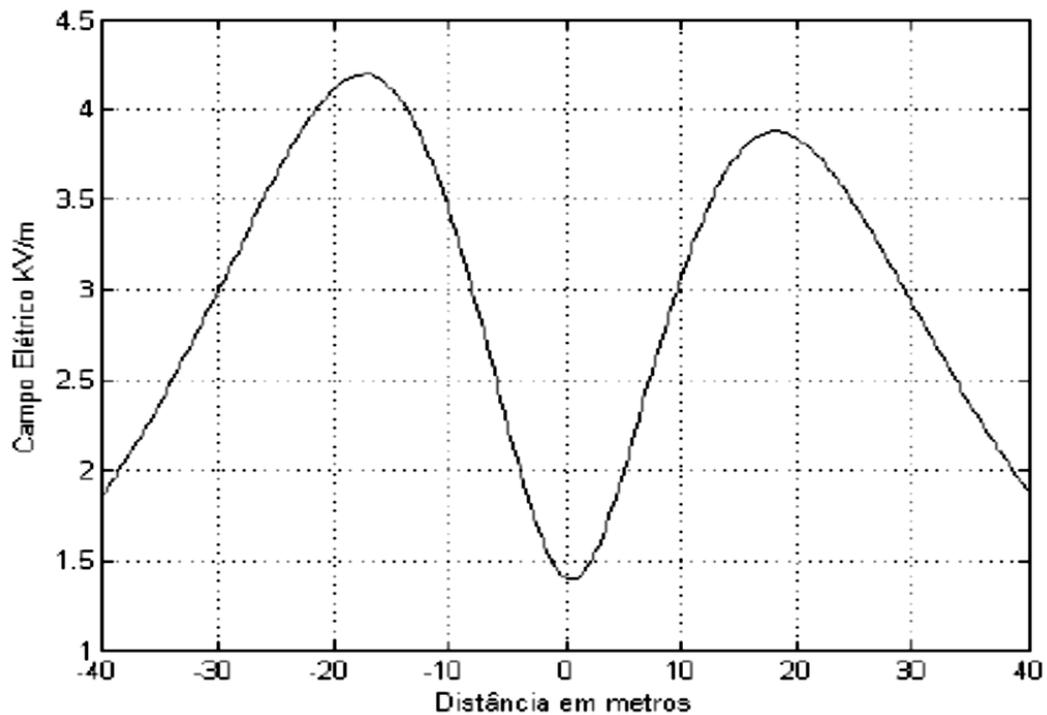
Figura 22– Perfil do campo elétrico obtido pelo autor da referência.



Fonte: Adaptado de Guimarães (2005).

Comparando as Figuras 21 e 22 nota-se que os perfis possuem grande semelhança quanto às suas respectivas tendências no plano transversal. Entretanto, o valor mínimo da fase B está possui valores que destoam. Este fato é observado por Santos (2011) em que, a Figura 23 demonstra os valores obtidos pelo programa computacional desenvolvido pelo mesmo.

Figuras 23– Perfil de campo elétrico para efeito comparativo entre as Figuras 21 e 22.



Fonte: (SANTOS, 2011, p. 69).

O gráfico obtido por Santos (2011) permite avaliar a precisão dos dados obtidos pelo programa computacional desenvolvido pelo mesmo. Realizando uma comparação entre as Figuras 21 e 23 observa-se que os valores em seus pontos mínimos são semelhantes. Sendo que, no primeiro o valor neste ponto foi de 1,4 kV/m e no segundo há um valor no mesmo ponto, de 1,4 kV/m, valores que facilitam confirmar a confiabilidade entre ambos os resultados.

O valor apresentado por Guimarães (2005) no ponto mínimo de seu gráfico é de 2 kV/m. Logo, o valor obtido pelo gráfico ilustrado pela Figura 21 foi 30% menor do que o valor apresentado pelo gráfico representado pela Figura 22. Diante do exposto, os valores mínimos estão muito próximos dos valores obtidos pelos autores. Em contrapartida, os valores obtidos no plano transversal seguem a mesma tendência quantos aos valores quantificados, podendo avaliar que os resultados são satisfatórios para validação do programa

computacional para obtenção dos níveis de campo elétrico. O Quadro 6 representa os valores aproximados encontrados a partir dos gráficos apresentados pelos autores citados, assim como, os resultados associados as simulações realizadas por este trabalho.

Quadro 6 - Valores aproximados de campo elétrico para o sistema representado pela Figura 19.

Posição (m)	Cálculo (kV/m) <b>Guimarães (2005)</b>	Cálculo (kV/m) <b>Santos (2011)</b>	Cálculo (kV/m) <b>O autor</b>
- 40	1,4	1,9	1,79
+ 40	1,4	1,9	1,79
0	2	1,4	1,4
Valor máximo posição [m] / valor [kV/m]	-15 / 4,2	-18 / 4,3	-18 / 4,2

Fonte: o autor.

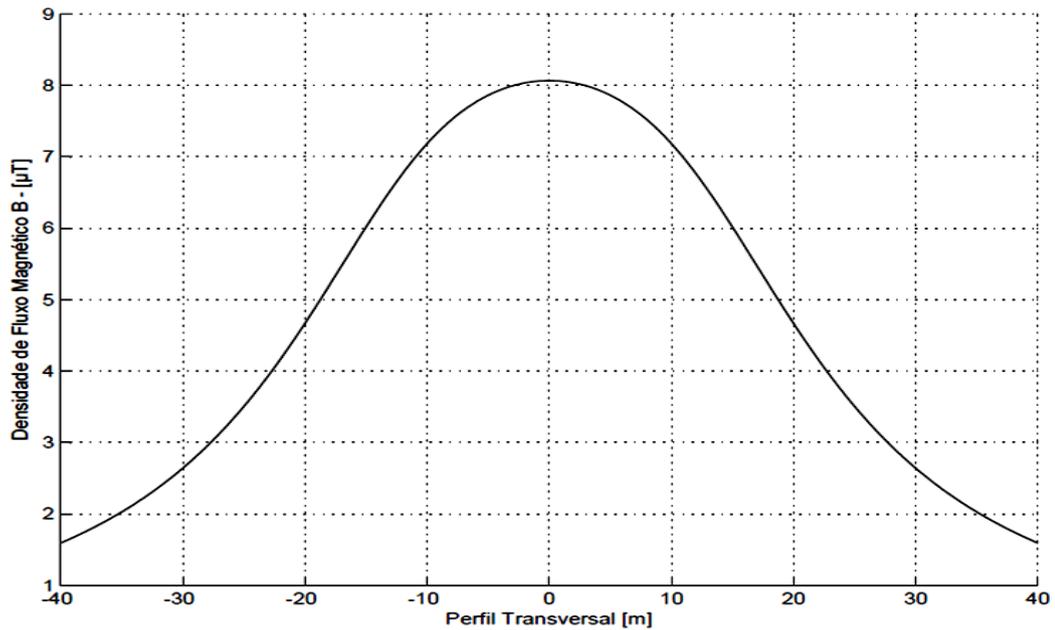
#### 4.2.2 Resultados associados à avaliação do campo magnético

Com base nos dados informados no item 4.2, e utilizando o programa computacional desenvolvido para quantificar os níveis de campo magnético, é realizada a simulação para comparação dos resultados com os mesmos valores apresentados pelas medições adquiridas por Guimarães (2005) para validação do programa. A escala de medição é preservada, ou seja, um perfil de 40 (quarenta) metros de seção transversal para cada lado da linha e avaliando os níveis de campo a 1 (um) metro em relação ao solo.

A Figura 24 é fornecida para representar o perfil de campo magnético obtido pelo programa elaborado para este trabalho. A Figura 25 ilustra o perfil de campo obtido por Guimarães (2005).

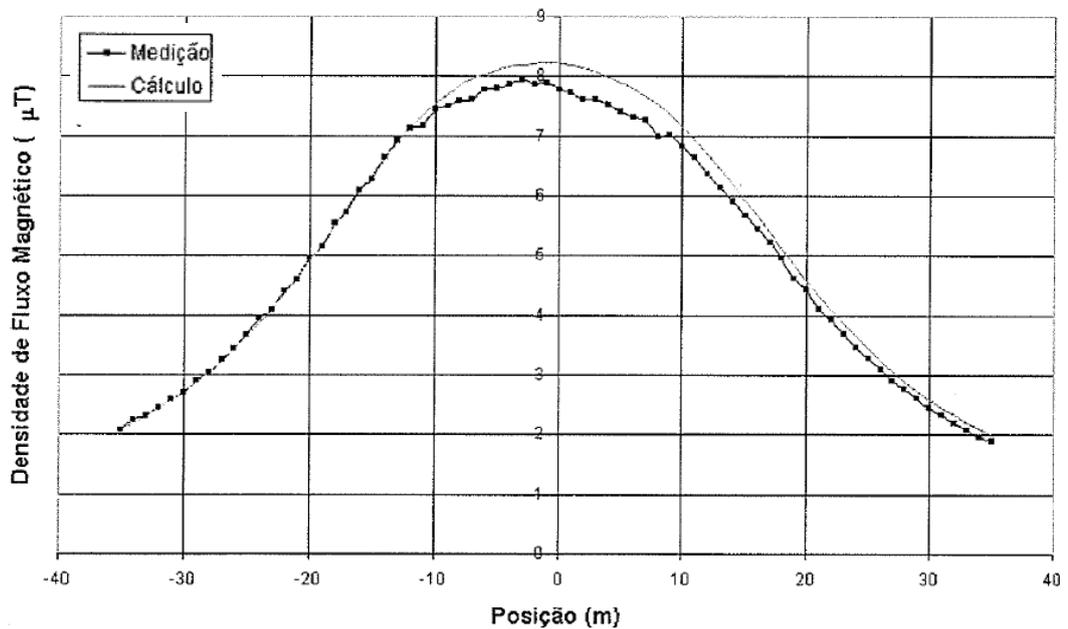
Apenas para efeitos comparativos, a Figura 26 é apresentada para visualização dos valores calculados por Vieira (2013). Posteriormente, o Quadro 7 é exposto para comparação entre os valores obtidos neste trabalho e aqueles dos autores supracitados.

Figura 24– Perfil de campo magnético resultante a partir do programa desenvolvido para o estudo do sistema representado pela Figura 19.



Fonte: O autor.

Figura 25– Perfil de campo magnético obtido por Guimarães (2005).



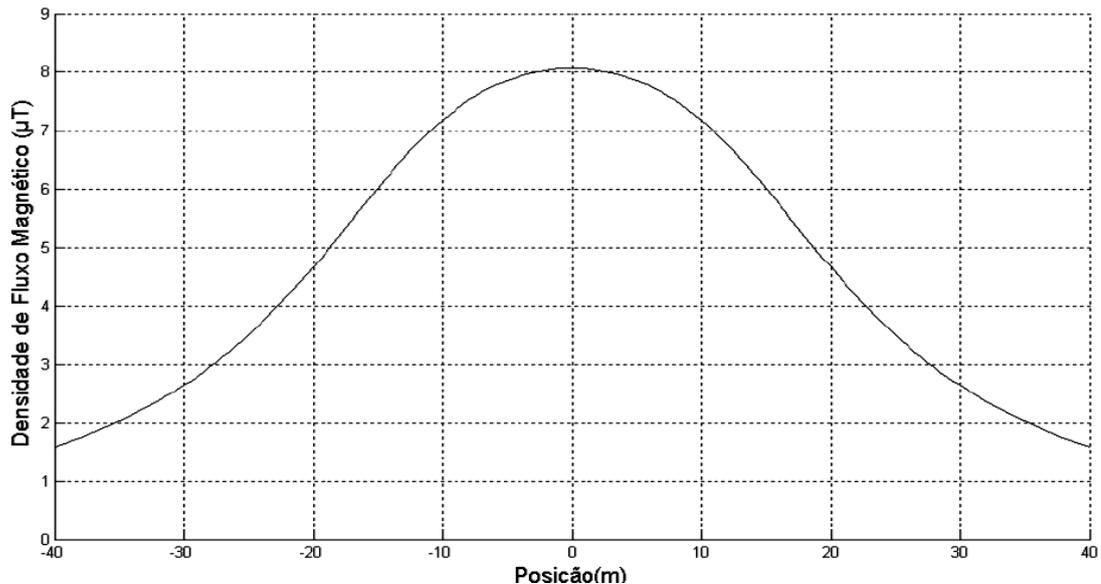
Fonte: Adaptado de Guimarães (2005).

Nota-se que os perfis transversais são semelhantes e seguem a mesma tendência relativa à sua convexidade.

Os valores obtidos pelo autor de referência e pelo programa desenvolvido estão muito próximos. Guimarães (2005) obteve o valor máximo de  $8 \mu\text{T}$  a uma posição de  $-1$  (menos um) metro. O programa desenvolvido obteve máximo de  $8,06 \mu\text{T}$  sobre o eixo de simetria,

posição zero no gráfico. Agora analisando os extremos da faixa de servidão. Os valores estimados via simulação computacional foram de  $1,592 \mu\text{T}$  para os pontos localizados entre  $\pm 40$  (quarenta) metros, enquanto os valores apresentados pelo autor de referência foram de  $1,5 \mu\text{T}$ .

Figura 26– Perfil de campo magnético para comparação.



Fonte: (VIEIRA, 2013, p. 81).

Os resultados obtidos por Vieira (2013) foram de  $1,59 \mu\text{T}$  para o limite entre  $\pm 40$  (quarenta) metros e um valor máximo de  $8,06 \mu\text{T}$  sobre o eixo de simetria. O Quadro 7 representa os valores encontrados a partir dos gráficos apresentados pelos autores citados e os resultados associados às simulações realizadas por este trabalho.

Quadro 7 - Valores de campo magnético para o sistema representado pela Figura 19.

Posição (m)	Medição ( $\mu\text{T}$ ) Guimarães (2005)	Cálculo ( $\mu\text{T}$ ) Vieira (2013)	Cálculo ( $\mu\text{T}$ ) O autor
- 40	1,5	1,59	1,592
+ 40	1,5	1,59	1,592
0	7,80	8,06	8,066
Valor máx. (posição [m] /valor [ $\mu\text{T}$ ])	-1 / 8,00	0 / 8,06	-0 / 8,066

Fonte: O autor.

Diante os dados apresentados, verifica-se uma proximidade entre os valores calculados via simulação computacional deste trabalho e os respectivos valores medidos e/ou calculados por Guimarães (2005) e Vieira (2013), no que favorece, pois os resultados são satisfatórios para validação do programa computacional para obtenção dos níveis de campo magnético.

### **4.3 Análises de perfil transversal do campo elétrico e magnético a 1 (um) metro do solo**

Definir a faixa de servidão é uma das etapas de grande importância para garantir a segurança de pessoas e animais localizados próximos das linhas de transmissão. Para definir esta faixa são avaliados, a 1 (um) metro acima do solo, os níveis de campo elétrico e magnético na vizinhança das mesmas, nas quais estes níveis deverão obedecer aos valores limítrofes predeterminados pelas normas específicas, conforme informado no Capítulo 3 deste trabalho.

Nesta subseção estão contidos os valores de campo elétrico e magnético obtidos a 1 (um) metro do solo dos três sistemas propostos na subseção 2.1 deste trabalho. É oportuno descrever, resumidamente, os parâmetros geométricos e elétricos das linhas de transmissão sob estudo:

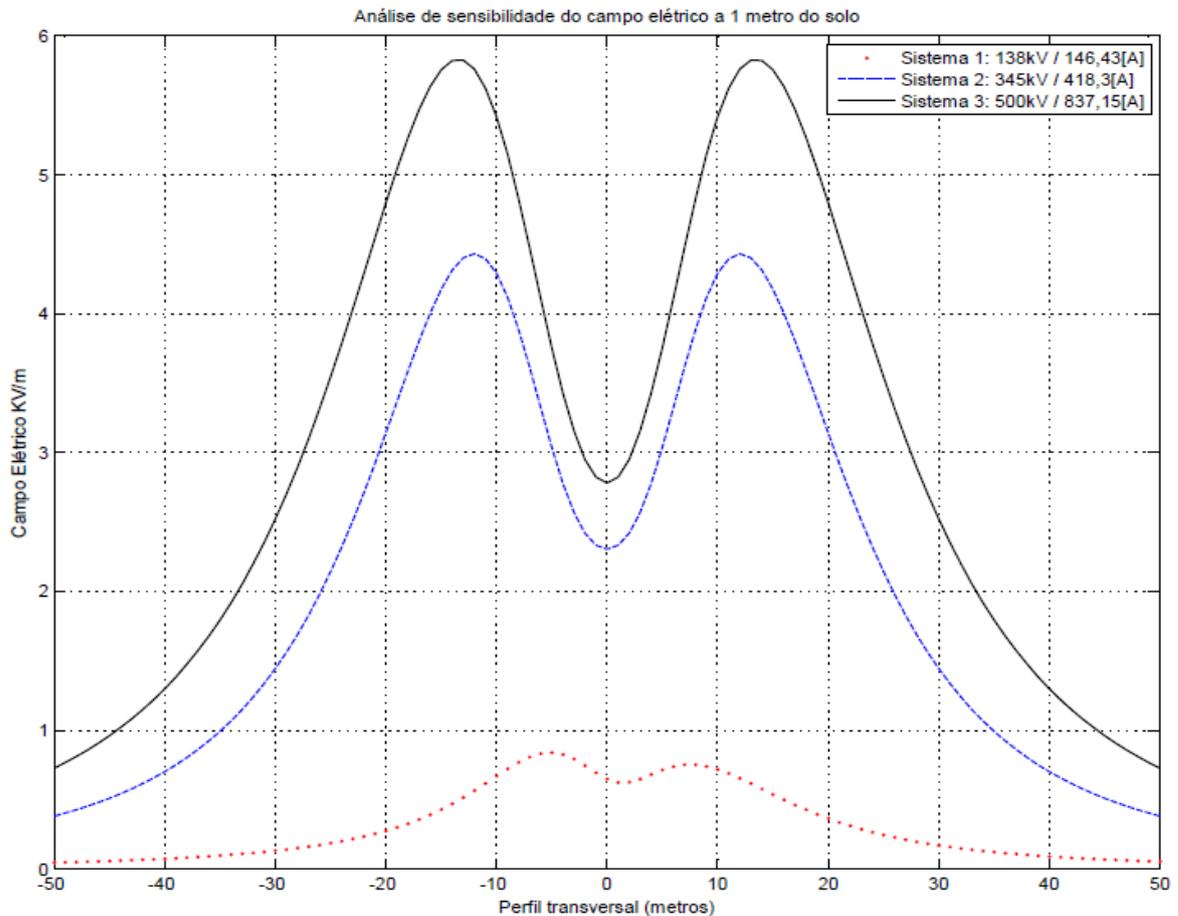
- a) Sistema 1: Circuito de característica simples, disposição vertical de suas fases, tensão de 138 kV e corrente de operação média de 146,3 A.
- b) Sistema 2: Circuito de característica simples, disposição horizontal de suas fases, tensão de 345 kV e corrente de operação média de 418,3 A.
- c) Sistema 3: Circuito de característica simples, disposição horizontal de suas fases, tensão de 500 kV e corrente de operação média de 837,15 A.

Santos (2011) utiliza um perfil transversal, para análise dos níveis de campo elétrico, que variam de -50 (menos cinquenta) metros até +50 (mais cinquenta) metros.

Vieira (2013) utiliza um perfil transversal para estudo dos níveis de campo magnético, os quais variam de -30 (menos trinta) metros até +30 (mais trinta) metros, considerando o solo como um meio ideal, cuja resistividade elétrica é igual a zero.

Diante das informações descritas, todas as características foram preservadas para obtenção dos resultados em mesma escala. Desta forma, realiza-se a simulação computacional, em que a Figura 27 ilustra o perfil do campo elétrico gerado pelas distribuições de carga nos condutores dos três sistemas sob estudo.

Figura 27– Análise de sensibilidade do campo elétrico para os três sistemas sob estudo.



Fonte: O autor.

Analisando a Figura 27, podem-se realizar as seguintes observações:

- Para os sistemas 1 e 2, os níveis de campo elétrico estão dentro dos valores limítrofes exigidos pelas normas;
- O sistema 3 apresenta níveis de campos elétricos que ultrapassam os níveis estabelecidos pelas normas. Tal resultado está relacionado ao nível de tensão da respectiva linha de transmissão;
- Os perfis obtidos pelas simulações computacionais demonstram a grande influência causada pelas configurações geométricas das linhas de transmissão;
- O sistema 1 possui disposição assimétrica de suas fases, assim, visualiza-se um formato de “M” discreto e assimétrico;
- O mesmo pode ser observado diante os formatos de perfil obtidos para os sistemas 2 e 3. A disposição simétrica entre as respectivas fases favorecem o aparecimento de uma imagem em formato de “M” bem definido. Isto é possível devido à existência de um ponto de

mínimo valor de campo elétrico entre as fases da linha de transmissão, ou seja, o ponto onde está localizada a fase B. As demais fases correspondem à condição equidistante do sistema, permitindo, então, obter este perfil de saída;

- e) Para os três sistemas sob estudo, os níveis de campos elétricos avaliados a partir de 20 metros do ponto central da linha de transmissão, apresentam valores inferiores aos limites permitidos por norma.

A seguir, cada sistema sob estudo é analisado separadamente, em formato de quadros para exposição dos valores calculados. Informações de grande importância no que tange os valores permissíveis por norma, o que neste primeiro momento refere-se apenas ao estudo dos níveis de campo elétrico, conforme Tabela 4 deste trabalho, são comparados com os valores obtidos via simulação computacional. A Equação (44) é utilizada para traduzir a variação percentual entre os valores dos níveis de campo elétrico em função dos valores limítrofes permitidos por normas específicas.

$$\% = \frac{\text{valor de campo do sistema}}{\text{valor limítrofe de acordo com a norma}} \times 100 \quad (44)$$

Quadro 8 - Avaliação numérica para o Sistema 1 (138 kV). Verificação dos níveis de campo elétrico obtidos via simulação computacional e os respectivos valores limítrofes, permissíveis por norma, para o público.

<b>Campo elétrico [kV/m]</b>	<b>Sistema1</b>		<b>ICNIRP / (%)</b>	<b>NBR 5422 / (%)</b>	<b>NBR 15415 / (%)</b>	<b>IRPA / (%)</b>		
Posição (m) Valor Máximo	-5	0,83	4,17	19,90	16,6	19,90	5	16,6
Posição (m) / Valor Mínimo	+8	0,75		17,98	15,0	17,98		15,0
0 m	0,65			15,58	13,0	15,58		13,0
Limite: -20 m	0,27			6,47	5,40	6,47		5,40
Limite: +20 m	0,36			8,63	7,20	8,63		7,20

Fonte: O autor.

Analisado o Quadro 8, verifica-se que o maior valor de campo elétrico obtido para o Sistema 1 não é suficiente para extrapolar o valor limítrofe permitido por norma para o indivíduo do público. É possível notar um valor de campo elétrico cujo valor refere-se a 19,90% do valor máximo de referência. Para uma distância de 20 (vinte) metros em relação ao eixo central, tem-se o valor máximo de 0,36 kV/m, o que representam apenas 8,63% do valor limítrofe.

Quadro 9 - Avaliação numérica para o Sistema 2 (345 kV). Verificação dos níveis campo elétrico obtidos via simulação computacional e os respectivos valores limítrofes, permissíveis por norma, para o público.

<b>Campo elétrico [kV/m]</b>	<b>Sistema 2</b>		<b>ICNIRP / (%)</b>	<b>NBR 5422 / (%)</b>	<b>NBR 15415 / (%)</b>	<b>IRPA / (%)</b>				
Posição (m) / Valor Máximo	-12	4,43	4,17	5	4,17	5	106,23	88,60	106,23	88,60
Posição (m) / Valor Mínimo	+12	4,43					106,23	88,60	106,23	88,60
0 m	2,30						55,15	46,00	55,15	46,00
Limite: -20 m	3,14						75,29	62,80	75,29	62,80
Limite: +20 m	3,14						75,29	62,80	75,29	62,80

Fonte: O autor.

Os resultados ilustrados pelo Quadro 9 permitem concluir que os níveis de campo elétrico a  $\pm 12$  (doze) metros do ponto central excedem 6,23% do valor limite para o público, considerando 4,17 kV/m como valor máximo de referência. Ao considerar 5,0 kV/m, o nível de campo neste mesmo ponto representa 88,6% do valor limítrofe, 11,4% abaixo do valor máximo permitido. Isto prova a necessidade do estudo relativo aos níveis de campo para determinação da faixa de servidão.

Nota-se também o decréscimo dos níveis de campo elétrico para um ponto situado a  $\pm 20$  (vinte) metros, cujos valores atingem 75,29% do valor de 4,17 kV/m, de acordo com as normativas, o que representa 24,71% abaixo do valor de referência. Avaliando no mesmo ponto, e tomando como valor limítrofe 5 kV/m, os níveis de campo ficam 62,80% deste valor, o que significa estar 37,2% abaixo do valor referencial.

Quadro 10 - Avaliação numérica para o Sistema 3 (500 kV). Verificação dos níveis de campo elétrico obtidos via simulação computacional e os respectivos valores limítrofes permissíveis por norma para o público.

<b>Campo elétrico [kV/m]</b>	<b>Sistema 3</b>		<b>ICNIRP / (%)</b>	<b>NBR 5422 / (%)</b>	<b>NBR 15415 / (%)</b>	<b>IRPA / (%)</b>				
Posição (m) / Valor Máximo	-13	5,82	4,17	5	4,17	5	139,56	116,40	139,56	116,40
Posição (m) / Valor Mínimo	+13	5,82					139,56	116,40	139,56	116,40
0 m	2,78						66,66	55,60	66,66	55,60
Limite: -20 m	4,79						114,86	95,80	114,86	95,80
Limite: +20 m	4,79						114,86	95,80	114,86	95,80

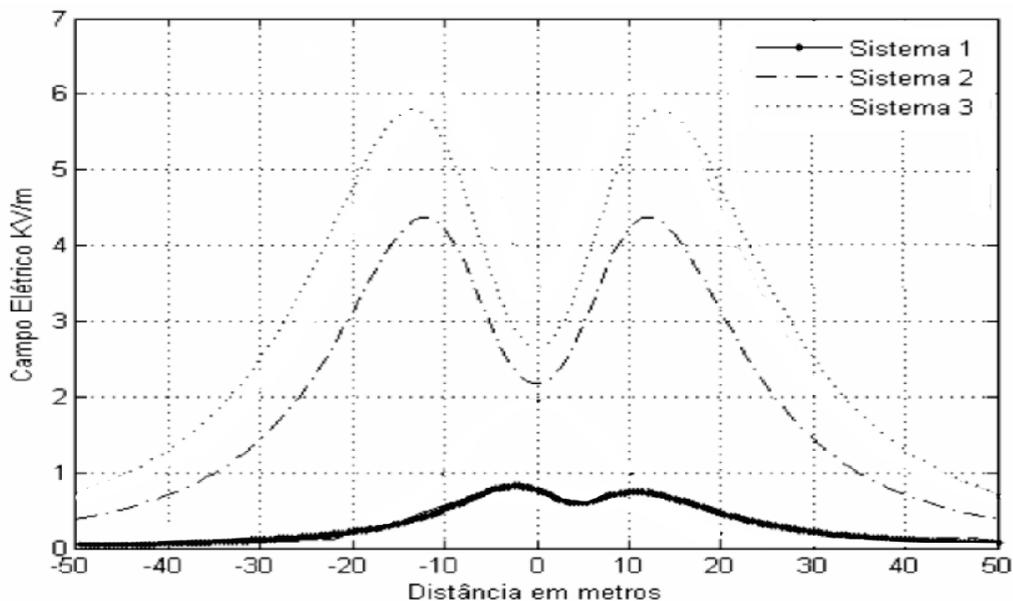
Fonte: O autor.

O Quadro 10 permite observar que os níveis de campos elétricos máximos ultrapassam os valores limítrofes estabelecidos por norma chegando a ultrapassar 39,56% localizado a  $\pm 13$  (treze) metros do ponto central da linha de transmissão. Tanto o Quadro 8, quanto o Quadro 9 possuem valores máximos de campo que extrapolam os valores permitidos por norma, pois os sistemas possuem níveis de tensão de alimentação superiores ao Sistema 1, como representado pelo Quadro 1. É oportuno informar que as normas que estipulam valores máximos de campos elétricos não consideram os valores de tensão de alimentação das respectivas linhas.

Nota-se que os níveis de campos elétricos calculados em  $\pm 20$  (vinte) metros também ultrapassam os valores máximos permitidos por norma, tais níveis ultrapassam cerca de 14,86% no respectivo ponto, decaindo para 4,03 kV/m no ponto localizado a  $\pm 23$  (vinte e três) metros, o que significa obter 96,64% do valor de referência (4,17 kV/m), ou seja, cerca de 3,36% abaixo do valor limítrofe.

Os níveis de campos elétricos podem ser medidos em quantidades cada vez menores ao ponto em que aumenta a faixa de servidão. Isto é notável em um ponto localizado a  $\pm 30$  (trinta) metros relativos ao centro da linha de transmissão. O respectivo valor calculado via simulação atinge 2,52 kV/m, o que representa 60,43% de 4,17 kV/m, como nível de campo elétrico limítrofe. Isto representa 39,57% abaixo dos níveis permitidos por norma. A Figura 28 ilustra o perfil obtido por Santos (2011) para efeito comparativo com a Figura 27.

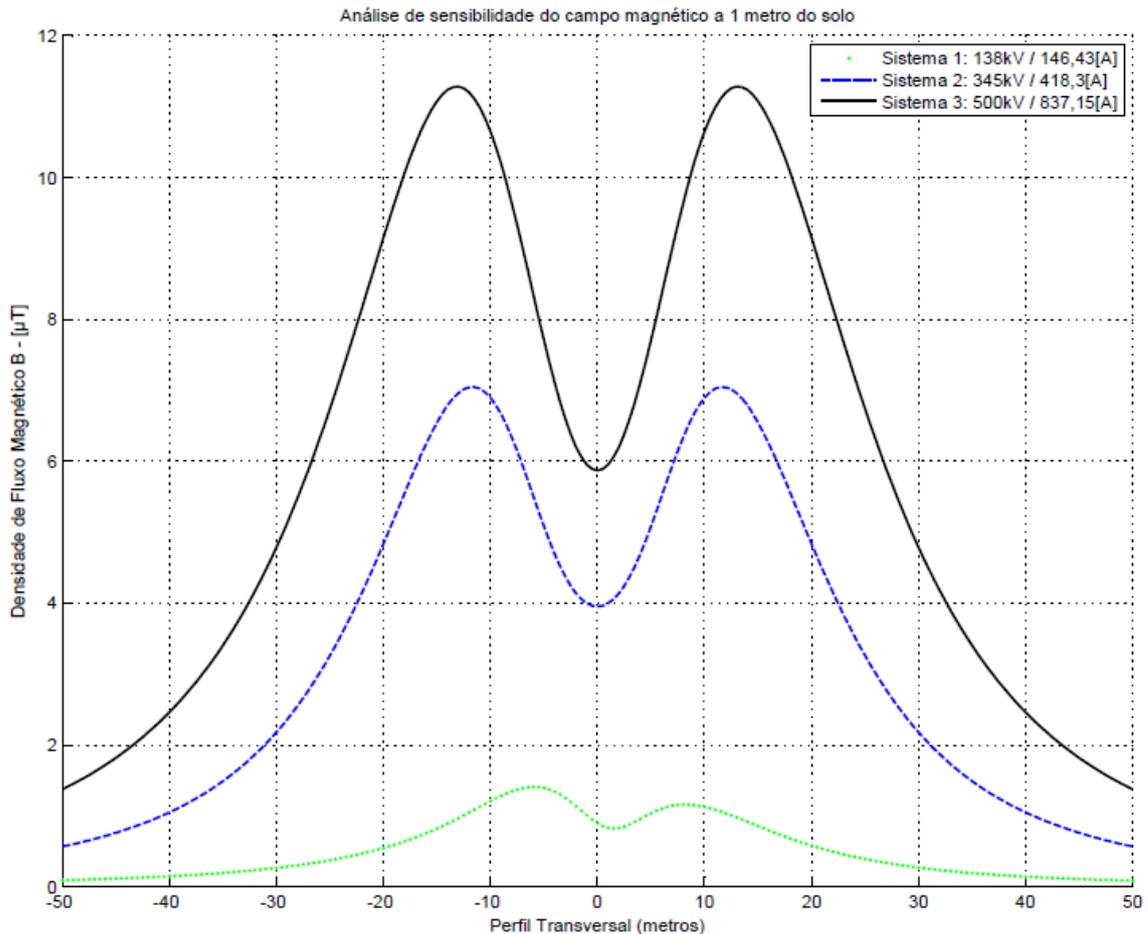
Figura 28 – Perfis de campos elétricos sob estudo.



Fonte: Adaptado de Santos (2011).

Após avaliação dos níveis de campos elétricos, a seguir, serão avaliados os níveis de campo magnético criados pelas distribuições de correntes elétricas para os três sistemas sob estudo, simultaneamente. A Figura 29 ilustra o perfil transversal obtido via simulação computacional.

Figura 29– Análise de sensibilidade do campo magnético para os três sistemas sob estudo.



Fonte: O autor.

Analisando a Figura 29, podem-se realizar as seguintes observações:

- Os níveis de campo magnético estão dentro dos valores limítrofes de acordo com as normas ao longo de toda extensão do perfil transversal / faixa de servidão;
- A relação entre campo magnético e intensidade de corrente elétrica é comprovada a partir dos perfis observados junto aos Sistemas 2 e 3. Nota-se que, em ambos os sistemas, os valores de campo magnético são maiores quando comparado com o Sistema 1 devido às suas correntes de operação;

- c) Nota-se assimetria quanto ao perfil de campo magnético para o Sistema 1. Isto se deve à disposição assimétrica de suas respectivas fases. As fases A e C estão dispostas verticalmente e localizadas ao mesmo lado, contribuindo para o perfil assimétrico de campo magnético e o mesmo formato é observado no perfil de campo elétrico para o mesmo sistema;
- d) Nota-se simetria do perfil de campo magnético para os Sistemas 2 e 3 devido a disposição simétrica e horizontal de suas respectivas fases;
- e) Os sistemas sob estudo apresentam um perfil de campo magnético transversal, em forma de “M”, evidenciando a influência geométrica das linhas de transmissão;
- f) É oportuno informar que as normas que estipulam valores máximos de campo magnético, não consideram os valores de tensão de alimentação das respectivas linhas.
- g) Os níveis de campo magnético, para todos os sistemas, decaem relativamente rápido atingindo valores baixos. Estes valores são informados nos Quadros 10 ao 12.

A seguir, cada sistema sob estudo é analisado individualmente. Informações de grande importância no que refere aos valores permissíveis por norma, que neste momento refere-se apenas ao estudo dos níveis de campo magnético, conforme Tabela 2 deste trabalho, são comparados com os valores obtidos via simulação computacional. A Equação (44) novamente é útil para traduzir a variação percentual entre os valores dos níveis de campo magnético em função dos valores limítrofes permitidos por normas específicas.

Quadro 11 - Avaliação numérica para o Sistema 1 (138kV). Verificação dos níveis de campo magnético obtidos via simulação computacional e os respectivos valores limítrofes permissíveis, por norma, para o público.

Densidade de fluxo magnético [μT]	Sistema 1		ICNIRP / (%)	NBR 5422 / (%)	NBR 15415 / (%)	IEEE C95.6 / (%)		
Posição (m) Valor Máximo	-6	1,40	83,3	1,68	83,3	1,68	904	0,15
Posição (m) / Valor Mínimo	+8	1,16		1,39		1,39		0,12
0 m	0,89			1,06		1,06		0,098
Limite: -30 m	0,26			0,31		0,31		0,028
Limite: +30 m	0,27			0,32		0,32		0,029

Fonte: O autor.

Quadro 12 - Avaliação numérica para o Sistema 2 (345kV). Verificação dos níveis de campo magnético obtidos via simulação computacional, e os respectivos valores limítrofes, permissíveis por norma, para o público.

Densidade de fluxo magnético [ $\mu\text{T}$ ]	Sistema 2		ICNIRP / (%)		NBR 5422 / (%)		NBR 15415 / (%)		IEEE C95.6 / (%)	
	Posição (m) / Valor Máximo	-12	7,04	83,3	8,45	83,3	8,45	83,3	8,45	904
Posição (m) / Valor Mínimo	+12	7,04	8,45		8,45		8,45		0,77	
0 m	3,95		4,74		4,74		4,74		0,43	
Limite: -30 m	2,17		2,60		2,60		2,60		0,24	
Limite: +30 m	2,17		2,60		2,60		2,60		0,24	

Fonte: O autor.

Quadro 13 - Avaliação numérica para o Sistema 3 (500kV). Verificação dos níveis de campo magnético obtidos via simulação computacional, e os respectivos valores limítrofes, permissíveis por norma, para o público.

Densidade de fluxo magnético [ $\mu\text{T}$ ]	Sistema 3		ICNIRP / (%)		NBR 5422 / (%)		NBR 15415 / (%)		IEEE C95.6 / (%)	
	Posição (m) / Valor Máximo	-13	11,28	83,3	13,54	83,3	13,54	83,3	13,54	904
Posição (m) / Valor Mínimo	+13	11,28	13,54		13,54		13,54		1,24	
0 m	5,86		7,03		7,03		7,03		0,64	
Limite: -30 m	4,78		5,73		5,73		5,73		0,52	
Limite: +30 m	4,78		5,73		5,73		5,73		0,52	

Fonte: O autor.

Analisando os quadros acima, fica evidente que os níveis máximos de campo magnético não extrapolam os valores limítrofes permitidos. É simples avaliar a grande redução nos valores de campo a partir do eixo central da torre até os limites  $\pm 30$  (trinta) metros. A redução dos valores de campo para o Sistema 1 atinge cerca de 80,71% de seu valor máximo, o que significa uma redução de aproximadamente  $1,13 \mu\text{T}$  do eixo central até as distâncias limites predeterminadas para a avaliação dos níveis de campo magnético.

Analisando o Sistema 2, observa-se uma redução de 69,17% de seu valor máximo de campo, o que vale aproximadamente  $4,86 \mu\text{T}$ . Para o Sistema 3, avalia-se uma redução de aproximadamente 57,62%, cerca de  $6,49 \mu\text{T}$  em relação ao seu valor máximo.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo apresentar um estudo sobre os níveis de campo elétrico e magnético nas proximidades de três modelos reais de linhas de transmissão operando em regime permanente. Tais níveis de campos foram posteriormente comparados com valores limítrofes estabelecidos pelas normas.

Os efeitos mais significativos em função de níveis elevados de campos elétricos e magnéticos, quando ultrapassam os valores limítrofes de segurança, podem ser nocivos às pessoas, animais ou objetos.

Para uma consistente análise é necessário, inicialmente, calcular os perfis transversais de campo elétrico e magnético. Estes perfis são influenciados em função da geometria da linha, fato observado em função da disposição das fases, níveis de corrente, tensão de operação e demais parâmetros elétricos específicos de cada linha de transmissão.

Os parâmetros relativos às grandezas físicas fundamentais para obtenção dos níveis de campo eletromagnético são obtidos a partir do programa computacional desenvolvido em *Matlab*® para elaboração deste trabalho.

As principais conclusões quanto às análises de sensibilidade de campo elétrico, permitem diversas conclusões dentro de uma expectativa geral, do que se destacam:

- a) Os níveis de tensão influenciam proporcionalmente os perfis transversais de campo elétrico;
- b) Os perfis transversais demonstram possuir grande sensibilidade quanto às configurações das linhas de transmissão;
- c) Em termos práticos, os níveis de campos elétricos apresentam uniformidade na região entre a superfície do solo e a 1 (um) metro de altura;
- d) Os perfis transversais de campo elétrico são validados a partir de comparações com resultados experimentais divulgados em Guimarães (2005). É possível notar grande singularidade entre os resultados obtidos neste trabalho e aqueles medidos e calculados pelo autor supracitado. Os resultados obtidos também são comparados com outras literaturas que também realizaram simulações computacionais, novamente, encontra-se em excelente concordância com os resultados;
- e) O perfil transversal de campo elétrico decai à medida que o ponto de análise afasta do eixo central da linha de transmissão;
- f) Todos os sistemas reais abordados neste trabalho possuem valores de campo elétrico dentro das normas regulamentadoras.

A seguir são realizadas as principais conclusões quanto às análises de sensibilidade de campo magnético dentro de uma expectativa geral, onde se destacam:

- a) A validação do resultado segue o mesmo padrão utilizado para validação do nível de campo elétrico. O programa desenvolvido obteve o perfil de campo magnético que, posteriormente, foi comparado com perfis de mesma natureza obtidos por meio de medições, bem como, outras comparações dos resultados encontrados com outras simulações computacionais existentes na literatura;
- b) Os níveis de corrente das linhas de transmissão influenciam proporcionalmente os perfis transversais de campos magnéticos;
- c) Os perfis transversais demonstram possuir grande sensibilidade quanto às configurações das linhas de transmissão;
- d) O perfil transversal de campo magnético decai à medida que o ponto de análise afasta do eixo central da linha de transmissão;
- e) Pode-se concluir que todos os sistemas analisados neste trabalho possuem seus níveis de campo magnético dentro das especificações exigidas pelas normas regulamentadoras.

## **5.1 Propostas de continuidade**

Os estudos realizados para alcançar o objetivo proposto por este trabalho possibilita abrir diversas discussões e uma série de implementações para continuidade deste trabalho, como:

Quanto ao tipo de operação, em regime permanente:

- a) Avaliação dos efeitos da exposição, em longo prazo, a campos elétricos e magnéticos em seres humanos e aspectos de segurança pessoal;
- b) Avaliação da viabilidade econômica quanto à instalação de dutos metálicos dentro da faixa de servidão de linhas de transmissão.

## REFERÊNCIAS

ABRADEE, “Setor Elétrico – Visão Geral do Setor,” Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica, 2017.

Disponível em: < <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNETICA – ABRICEM. **Diretrizes para limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, variáveis no tempo (até 300 GHz)**, [s.l: s.n.], 1999. Disponível em: <<http://abricem.com.br/documentacao/normas-e-regulamentacoes/>>. Acesso em: 27 set. 2017.

ANEEL, “Banco de Informações de Geração – Capacidade de Geração do Brasil,” Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.

Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

ANEEL, “Banco de Informações de Geração – Os 10 Agentes de Maior Capacidade Instalada no País,” Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.

Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/AgenteGeracao/GraficoDezMajoresPotencia.asp>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15145. **Métodos de medições de níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 a 60 Hz**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422. **Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 11 p.

BUCK, J. A.; J. HAYT, W. H.; **Eletromagnetismo**. 8.ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 595 p.

DERI, A. et al. “The Complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return.” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100, Aug. 1981. p. 3686–3694.

FUCHS, R. D. **TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELETRICA**. Rio de Janeiro: LTC/EFEL, 1977.

GONÇALVES, F. A.; LOPES, J. C. R. **Instalações de subestações pré-fabricadas na faixa de passagem de linhas de transmissão**. Eletricidade Moderna, Ano XXXVII, 2008.

GUIMARÃES, G. E. **Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

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. 34 p.

IEEE-C95.6. “**Standart of Safety Levels with Respect to Human Exposure to Eletromagnetics Fields,0 to 3 kHz,**” Piscataway, N. J.; Subcommittee 3 of Standards Coordinating Subcommittee 28.23 Oct. 2002. 50 p.

LÚCIO, S. M. M. **PARÂMETROS LONGITUDINAIS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO:** Análise dos efeitos do solo e da frequência para a aplicação em estudos de transitórios eletromagnéticos. 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João Del Rei, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2012.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. **Introdução ao Sistema de Energia Elétrica.** Campinas: UNICAMP, 2003.

MMW, “Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico,” Ministério de Minas e Energia Disponível em:

<<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/boletins-2017>>.

Acesso em: 18 mar. 2017.

NEUROLOGIA, “PARKINSON – O que é?”, Sociedade Beneficente Israelita Brasileira, 2016.

Disponível em:<<https://www.einstein.br/doencas-sintomas/parkinson>>. Acesso em: 29 abr. 2017.

NEUROLOGIA, “ESCLEROSE MULTIPLA – O que é?”, Sociedade Beneficente Israelita Brasileira/

Disponível em:<<https://www.einstein.br/doencas-sintomas/esclerose-multipla>

Acesso em: 29 de Abr. de 2017.

PIRES, L. F. A. **GESTÃO AMBIENTAL DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.** 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense, 2005.

POWER LINES – LOW FREQUENCY, “ On the Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz),” International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP

Disponível em:<<http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPFactSheetLF.pdf>>.

Acesso em: 29 de Abril de 2017.

SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. “**A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields.**”IEEE, 4 Dec. 1973. 1660–1668.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo.** 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 704 p.

SANTOS, M. G. **Acoplamento Elétrico entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos.** 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João Del Rei, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2011.

SCHROEDER, M. A. O. **Concepção de um Sistema para Extração de Energia Elétrica de Linhas de Transmissão através do Acoplamento Magnético.** 1996. Dissertação (Mestrado) – Departamento Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

TEIXEIRA, P. C. O. Avaliação dos níveis de campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão da CTEEP. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16, 2001, Campinas. **Anais...** Campinas: [s.l], 2001. 6p. Disponível em: <<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20090220170157-SCQ-029%20NAO%20LANCADO.pdf>>. Acesso em: 27set. 2017.

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.