



Simulação e análise de sensibilidade de campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão

João Vitor Barboza da Silva

Orientado por

Professora Doutora Ângela Paula Ferreira

Professor Doutor Paulo Victor de Souza Borges

Bragança

2020/2021



Simulação e análise de sensibilidade de campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão

João Vitor Barboza da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Dupla Diplomação entre o Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca e o Instituto Politécnico de Bragança, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Orientado por

Professora Doutora Ângela Paula Ferreira

Professor Doutor Paulo Victor de Souza Borges

Bragança

2020/2021

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado saúde e perseverança para viver cada conquista e por sempre me guiar.

Aos meus pais, Izabel Barboza e Jorge Silva, e às minhas irmãs, Ariane Barboza e Crislayne Barboza, por todo suporte e incentivo ao longo da minha caminhada acadêmica.

À minha noiva Graciele Abreu, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos. A todos os meus amigos, em especial, Carlos Antônio Pinheiro, Gabriela Santana, Gustavo Palma, Luan Schimidt, Tainá Soares e Marcella Guarilha, por todo apoio e companheirismo durante a faculdade.

A minha orientadora Prof. Dr^a. Ângela Paula Ferreira por toda paciência e que apesar das dificuldades durante a realização do trabalho prestou suporte e incentivo. Aos professores Paulo Victor Borges, Thiago Resende e Alan Ferreira que serviram de inspiração para trilhar esse caminho.

Aos companheiros de trabalho da Ghenova Brasil, por todo suporte e aprendizado adquiridos durante o estágio profissional.

E por fim, ao Programa de Dupla Diplomação entre o Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca e o Instituto Politécnico de Bragança pela oportunidade.

Resumo

O setor elétrico tem se expandido nos últimos anos para suprir a demanda por energia. A construção de novas instalações, como subestações e linhas de transmissão, no entanto, tem gerado preocupação na sociedade frente aos efeitos biológicos decorrentes dos campos eletromagnéticos gerados por esses empreendimentos.

Baseado em pesquisas, normas foram estabelecidas a fim de limitar a exposição dos indivíduos a campos eletromagnéticos de baixa frequência (CEMBF). Com o objetivo de atender a essas especificações, este trabalho propõe uma implementação computacional, em MATLAB®, capaz de calcular os campos elétricos e magnéticos (CEM) através do Método de Simulação de Cargas (MSC), e a análise do perfil transversal ao longo da faixa de servidão para uma linha de transmissão aérea (LT). A validação do software é obtida por meio de comparação com casos reais disponibilizados na literatura. Por meio da análise de sensibilidade de parâmetros da LT, estuda-se o comportamento dos campos, permitindo alteração de características da rede ainda em fase de projeto.

Palavras-chave: Linhas Aéreas de Transmissão, Campos Elétricos, Campos Magnéticos, Campos eletromagnéticos de baixa frequência.

Abstract

The electricity sector has expanded in recent years to meet the demand for energy. The construction of new facilities, such as substations and transmission lines, however, has generated concern in society regarding the biological effects arising from the electromagnetic fields generated by these projects.

Based on research, standards were defined in order to limit the exposure of low frequency electromagnetic fields (CEMBF). In order to meet these specifications, this work aims at a computational implementation, in MATLAB®, capable of calculating the electric and magnetic fields (CEM) through the Load Simulation Method (MSC), an analysis of the transverse profile along the right of way for an overhead transmission line (LT). Software validation is obtained through comparison with real cases available in the literature. Through the sensitivity analysis of LT parameters, the behavior of the fields is studied, allowing changes in the characteristics of the network still in the design phase.

Keywords: Overhead Transmission Lines, Electric Fields, Magnetic Fields, Low Frequency Electromagnetic Fields.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Metodologia e Trabalho Realizado	2
1.3	Organização do Trabalho	2
2	Fundamentação Teórica	4
2.1	Campos Eletromagnéticos	4
2.1.1	Atuação dos campos sobre o corpo humano	5
2.1.2	Normalização e recomendações	7
2.2	Linhas de transmissão aéreas	10
2.3	Métodos de Cálculo	11
2.4	Método de Cálculo dos campos eletromagnéticos	12
2.4.1	Campo Elétrico	12
2.4.1.1	Lei de Coulomb	12
2.4.1.2	Lei de Gauss	13
2.4.1.3	Campo elétrico em Linhas de Transmissão	14
2.4.2	Campo Magnético	18
2.4.2.1	Lei de Biot-Savart	19
2.4.2.2	Lei de Ampère	20
2.4.2.3	Campo magnético em Linhas de Transmissão	21
2.5	Considerações finais	23
3	Implementação e sistemas em estudo	24
3.1	Implementação do programa	24
3.2	Características dos sistemas em estudo	27
3.2.1	Caso 1: LT 500 kV Neves 1 – Vespasiano 2	27
3.2.2	Caso 2: LT 230 kV Pau Ferro – Santa Rita II	29
3.2.3	Caso 3: LT 230 kV Campina Grande II - Natal II	30
3.2.4	Caso 4: Caso base para as análises de sensibilidade	31
4	Resultados e Análises	33
4.1.1	Caso 1	33
4.1.2	Caso 2:	37
4.1.3	Caso 3	40
4.2	Análise de sensibilidade dos campos elétricos e magnéticos em uma LT	43

4.2.1	Caso Base:	43
4.2.2	Análise de sensibilidade com a variação da altura dos condutores em relação ao solo	45
4.2.3	Análise de sensibilidade com a variação da distância horizontal entre os condutores	47
4.2.4	Análise de sensibilidade com a variação do diâmetro dos condutores	48
5	Conclusão	51
5.1	Conclusões Gerais	51
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	52
	Referências bibliográficas.....	53
	Anexo A - Código de programação geral para o cálculo dos Campos Elétricos e Magnéticos em linguagem MATLAB® aplicado ao caso base.....	55

Lista de Tabelas

Tabela.1- Limitações básicas para exposição de seres humanos a campos magnéticos e eléctricos variáveis ao longo do tempo [8].....	8
Tabela.2- Níveis de referência para a exposição ocupacional a campos eletromagnéticos variáveis ao longo do tempo (valores rms de campo não perturbado) [8].	9
Tabela.3- Níveis de referência para a exposição do público em geral a campos eléctricos e magnéticos variáveis ao longo do tempo (valores rms de campo não perturbado) [8].	9
Tabela.4- Níveis de Referência de Campos Elétrico e Magnético [10].	10
Tabela.5- Características da LT 500 kV Neves 1 – Vespasiano 2.	28
Tabela.6-Dados da topografia do solo [1].	28
Tabela.7- Características LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II [22].	29
Tabela.8- Características LT 230 kV Campina Grande II - Natal II [22].	30
Tabela.9- Características da LT adotada para o caso base.	32
Tabela.10-Tabela comparativa para o campo eléctrico obtido no caso 1 de validação.	36
Tabela.11-Tabela comparativa para o campo magnético obtido no caso 1 de validação.	36
Tabela.12-Tabela comparativa para o campo eléctrico obtido no caso 2 de validação.	39
Tabela.13-Tabela comparativa para o campo magnético obtido no caso 2 de validação.	39
Tabela.14-Tabela comparativa para o campo eléctrico obtido no caso 3 de validação.	42
Tabela.15-Tabela comparativa para o campo magnético obtido no caso 3 de validação.	42
Tabela.16- Campos eléctricos obtidos ao longo da faixa de servidão para o caso base.	43
Tabela.17- Campos magnéticos obtidos ao longo da faixa de servidão para o caso base.	44
Tabela.18- Alturas médias dos condutores para a análise de sensibilidade da variação da altura média em relação do solo.	46

Lista de Figuras

Figura.1– Espectro Eletromagnético [3].	5
Figura.2 - Variação da altura ao longo de um vão. Parâmetros da catenária [12].	11
Figura.3– Superfície Gaussiana de simetria cilíndrica em um fio condutor [15].	14
Figura.4– Diagrama para o cálculo dos coeficientes de potencial [17].	16
Figura.5– Raio equivalente de um feixe geminiano [16].	17
Figura.6– Lei de Biot-Savart em um fio condutor transportando uma corrente I [15].	19
Figura.7– Lei de Ampere aplicada a um fio condutor [13].	20
Figura.8– Método das Imagens Complexas de A. Deri para um sistema monofásico. [21]	22
Figura.9– Fluxograma do algoritmo implementado.	26
Figura.10–Estrutura característica da LT 500 kV Neves 1 – Vespasiano 2 [1].	28
Figura.11– LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II [22].	29
Figura.12– LT 230 kV Campina Grande II - Natal II [22].	30
Figura.13– Estrutura considerada para o caso base.	31
Figura.14–Perfil transversal do campo elétrico simulado para o caso 1 de validação.	34
Figura.15– Perfil transversal do campo elétrico medido e calculado pela referência do caso 1 de validação [1].	34
Figura.16– Perfil transversal do campo magnético simulado para o caso 1 de validação.	35
Figura.17– Perfil transversal do campo magnético medido e calculado pela	35
Figura.18– Perfil transversal do campo elétrico simulado para o caso 2 de validação.	37
Figura.19– Perfil transversal do campo magnético simulado para o caso 2 de validação.	37
Figura.20– Perfil transversal do campo elétrico simulado por CHESF disponibilizado pela referência do caso 2 de validação [22].	38
Figura.21–Perfil transversal do campo elétrico e calculado pela referência do caso 2 de validação.	38
Figura.22– Perfil transversal do campo magnético simulado por CHESF disponibilizado pela referência do caso 2 de validação [22].	38
Figura.23– Perfil transversal do campo magnético calculado pela referência do caso 2 de validação.	39
Figura.24– Perfil transversal do campo elétrico simulado para o caso 3 de validação.	40
Figura.25– Perfil transversal do campo elétrico simulado para o caso 3 de validação.	41
Figura.26– Perfil transversal do campo elétrico simulado por CHESF disponibilizado pela referência do caso 3 de validação [22].	41
Figura.27– Perfil transversal do campo elétrico e calculado pela referência do caso 3 de validação.	41
Figura.28– Perfil transversal do campo magnético simulado por CHESF disponibilizado pela referência do caso 3 de validação [22].	42
Figura.29– Perfil transversal do campo elétrico e calculado pela referência do caso 3 de validação.	42
Figura.30– Perfil transversal do campo elétrico obtido para o caso base.	44
Figura.31–Perfil transversal do campo magnético obtido para o caso base.	45

Figura.32–Comparação entre os perfis transversais do campo elétrico para a variação da altura dos condutores em relação ao solo.....	46
Figura.33–Comparação entre os perfis transversais do campo magnético para a variação da altura dos condutores em relação ao solo.....	46
Figura.34–Comparação entre os perfis transversais do campo elétrico para a variação da distância horizontal entre os condutores.	47
Figura.35–Comparação entre os perfis transversais do campo magnético para a variação da distância horizontal entre os condutores.	48
Figura.36–Comparação entre os perfis transversais do campo elétrico para a variação dos diâmetros equivalentes dos feixes dos condutores.....	49
Figura.37– Comparação entre os perfis transversais do campo elétrico para a variação dos diâmetros equivalentes dos feixes dos condutores.....	49

Lista de Abreviações / Acrônimos

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CEM - Campos Elétricos e Magnéticos

CEMBF - Campos eletromagnéticos de baixa frequência

CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

LT - Linha de Transmissão Aérea

Capítulo 1

1 Introdução

A crescente evolução do setor elétrico é caracterizada pela demanda por energia que tem aumentado nos últimos anos. A energia elétrica, assim como as demais fontes de energia, desempenha papel fundamental no processo de desenvolvimento tecnológico e econômico de uma nação. A energia elétrica é responsável por movimentar motores em indústrias, iluminação de cidades e funcionamento de eletrodomésticos. Essa demanda por energia elétrica gera uma necessidade de novas instalações, em destaque, as linhas de transmissão, que são responsáveis pelo transporte de energia por longas distâncias, sendo capaz de alimentar cidades afastadas das unidades geradoras, e por interligar diferentes centros de produção e consumo para garantir um fornecimento de energia de qualidade.

A fim de atender os grandes centros consumidores, as linhas de transmissão (LT) têm sido projetadas para serem capazes de transportar maiores potências, acarretando um aumento da corrente transportada ou das tensões de operação. Esse aumento pode acarretar em alguns problemas, com destaque o aumento de campos elétricos e magnéticos (CEM) produzidos. Os seres humanos são expostos a diversos campos eletromagnéticos todos os dias, sejam eles provenientes de meios de comunicação, eletrodomésticos, telefones ou por linhas de transmissão, como será abordado neste trabalho.

Os efeitos ocasionados pela ação dos campos eletromagnéticos sobre indivíduos têm sido motivos de estudo ao longo dos últimos anos. Com base em estudos e pesquisas, agências regulamentares desenvolveram diretrizes normativas e definiram limites de exposição aos campos eletromagnéticos.

Por meio da implementação computacional, é possível estudar e analisar o comportamento das linhas de transmissão em aplicações reais, ainda em fase de projeto, e

verificar se atende aos padrões estabelecidos por norma, não sendo necessário, na maioria dos casos, as medições de campo, garantindo segurança assim em sua operação.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de uma ferramenta computacional para o cálculo dos CEM gerados por linhas de transmissão aéreas utilizando o método de simulação de cargas e o método das imagens. Este trabalho busca também analisar a sensibilidade dos campos diante da variação de alguns parâmetros característicos das linhas, como diâmetro e altura dos condutores em relação ao solo e distância horizontal entre as fases, para que assim, as linhas de transmissão aéreas possam ser projetadas em acordo com os limites especificados por norma. A fim de validar o programa, os resultados foram comparados com outros trabalhos disponíveis na literatura, que apresentam dados de simulação computacional e medições de campo, garantindo uma confiabilidade maior do algoritmo elaborado.

1.2 Metodologia e Trabalho Realizado

O desenvolvimento do trabalho é baseado na reprodução de formulações matemáticas aplicadas a cálculos de CEM em LTs para linguagem de programação MATLAB®. A validação dos resultados obtidos é realizada por meio de dados de outras simulações e medições reais de campo disponíveis na literatura. Por fim, são analisados os comportamentos dos campos mediante a variação das distâncias dos condutores entre si, a altura em relação ao nível do solo e os seus diâmetros.

1.3 Organização do Trabalho

No capítulo 1 é apresentado a introdução do trabalho, categorizada em motivação, objetivos, metodologia e trabalho realizado e a maneira que o trabalho foi organizado.

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos utilizados para a realização do trabalho. Na primeira seção são introduzidos os efeitos ocasionados pela exposição dos seres humanos aos campos eletromagnéticos e as normas regulamentares dos níveis dos campos em

linhas de transmissão. Em seguida, é discorrido o conceito de linhas de transmissão e sua composição. Por fim, são apresentados métodos utilizados na literatura para o cálculo de campos eletromagnéticos e os conceitos e as formulações matemáticas do método utilizado para a criação do algoritmo de cálculo implementado através do software MATLAB®.

No capítulo 3, inicialmente, é apresentada a metodologia de implementação do software proposto e as premissas utilizadas. Em seguida, os casos estudados por este trabalho são explorados.

No capítulo 4 os resultados são analisados e discutidos. Primeiro, verifica-se a validação da programação implementada através da comparação de resultados de linhas de transmissão distintas e de diferentes características. Em seguida, é realizada uma análise de sensibilidade por meio do programa proposto, utilizado um modelo característico de linhas de transmissão.

Por fim, no capítulo 5 são evidenciadas as principais conclusões obtidas e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo aborda a interação entre os campos eletromagnéticos e os seres humanos, apresentar algumas instituições nacionais e internacionais de pesquisas e destacar as recomendações e normas vigentes. Apresenta também os métodos existentes para o cálculo dos campos eletromagnéticos na literatura e fundamenta os cálculos utilizados no algoritmo implementado por este trabalho.

2.1 Campos Eletromagnéticos

Além das fontes naturais de ondas eletromagnéticas, como o campo magnético estático da Terra, as ondas eletromagnéticas geradas pelas descargas atmosféricas e os campos elétricos oriundos de nuvens carregadas, existem as fontes criadas pelo homem, que são aquelas que podem ser utilizadas para comunicação e aquelas que geram e transmitem a energia elétrica. É possível a classificação das diversas ondas eletromagnéticas de acordo com a sua frequência característica por meio de um espectro de frequência ou espectro eletromagnético (Figura.1) [1].

De uma forma geral, os CEM são acoplados. Porém, quando em baixas frequências, podem ser analisados de maneira independente, como ocorre em Linhas de transmissão, que em regime permanente operam em 50 e/ou 60_Hz, de acordo com o local de instalação [2].

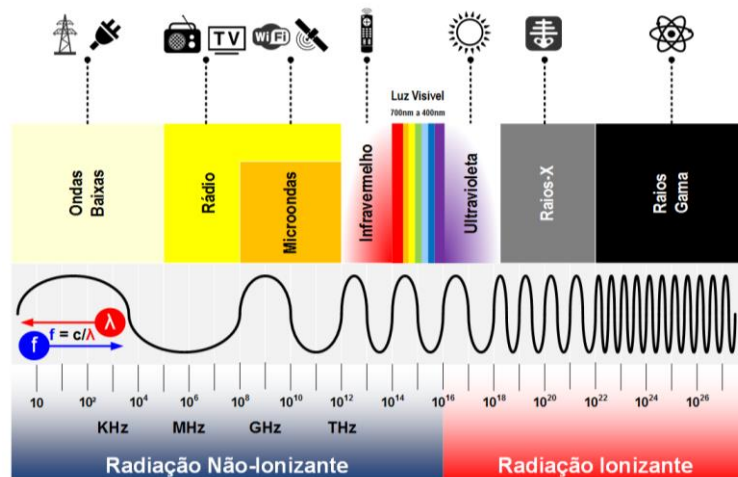


Figura.1– Espectro Eletromagnético [3].

2.1.1 Atuação dos campos sobre o corpo humano

A fim de entender os efeitos ocasionados pela exposição humana aos campos eletromagnéticos, quantificar e definir limites a essa exposição, diversos estudos e pesquisas científicas foram desenvolvidas resultando em publicações e normas. A Comissão Internacional de Proteção contra a radiação não ionizante (ICNIRP), em 1998, e o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), em 2002, desenvolveram guias normativas que estabelecem limites para a exposição aos campos eletromagnéticos que são utilizados como base normativa para diversos países [5].

Diversas atividades do corpo humano, assim como a maioria das reações bioquímicas, são provenientes de pequenas correntes elétricas. Como exemplo, destaca-se as atividades cerebrais e os nervos, que transmitem sinais através de impulsos elétricos. Porém, quando em contato com níveis um pouco mais elevados de corrente, o organismo pode sofrer danos.

De acordo com as diretrizes da ICNIRP, quando o ser humano é exposto a CEMBF, campos elétricos e correntes são gerados no interior de seus corpos podendo interagir com os fluxos de corrente e campos elétricos naturais do organismo acarretando danos, dependendo do nível de interação [5].

Quando expostos a campos eletromagnéticos, os efeitos sobre os corpos dependem da frequência e da magnitude. Em baixas frequências, os campos magnéticos variantes induzem

campos elétricos sobre o corpo humano que induzem corrente circulares nos tecidos do organismo. O campo elétrico induzido gerado é expresso pela equação (1) [18].

$$\oint \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

sendo,

\vec{E}_i o campo elétrico induzido [V/m];

\vec{B} campo magnético variante com o tempo [T].

Os campos elétricos externos, também em baixa frequência, induzem cargas oscilantes na superfície dos corpos, produzindo assim correntes no interior dos corpos. As densidades de corrente (J) geradas pelo campo elétrico são dadas por:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}_i \quad (2)$$

onde,

\vec{J} densidade de corrente [A/m²]

σ é a condutividade elétrica do tecido [S/m];

\vec{E}_i o campo elétrico induzido. [V/m]

Verifica-se então que as correntes que circulam no organismo dependem da condutividade do corpo e a magnitude do campo induzido. Segundo ICNIRP, os campos elétricos induzido no interior dos corpos são inferiores aos campos externos, cerca de cinco ou seis ordens de grandeza [8].

Os efeitos gerados por CEMBF podem ser de curta e longa duração. Para os efeitos de curta duração destacam-se a ação dos campos elétricos sobre os tecidos do corpo, influência sobre nervos e músculos podendo ocasionar sensação de formigamento e contração involuntária, parada respiratória, caso afete os músculos responsáveis pela respiração, e até mesmo queimaduras de tecidos e parada cardíaca caso os níveis sejam elevados [9].

Já para os casos de longa duração, não existem evidências laboratoriais suficientes para comprovar que os campos magnéticos e elétricos influenciam o aparecimento de doenças como Parkinson, esclerose múltipla e leucemia infantil [8].

2.1.2 Normalização e recomendações

Como introduzido no tópico anterior, diretrizes e normas regulatórias foram publicadas com o objetivo de limitar a exposição de pessoas à CEM tendo o conhecimento dos efeitos ocasionados pelos mesmos, principalmente em curto prazo.

Com base nas normas da ICNIRP, aplicáveis a todas as instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, a legislação imposta no Brasil é a resolução normativa nº 398 imposta pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), criada em 2010. Em Portugal foi adoptada a Recomendação do Conselho Europeu através da Portaria nº 1421/2004, de 23 de Novembro.

Diversas organizações, inclusive a ICNIRP, ao regulamentar os limites de exposição aos CEM, dividem os limites para exposição ocupacional e exposição do grande público. Assume-se que a exposição ocupacional é composta por adultos em seus locais de trabalho, realizando atividades de rotina com conhecimento dos riscos a que se expõem, operando então com medidas de segurança. A exposição do grande grupo, no entanto, aplica-se às pessoas de todas as faixas etárias, com condições de saúde distintas, expostas a condições desconhecidas na maioria dos casos, o que demandam limitações à exposição mais rigorosas em relação ao público ocupacional.

Por meio de pesquisas e artigos disponibilizados na literatura, a ICNIRP [8] quantificou os campos elétricos internos induzidos necessários para a ocorrência dos efeitos adversos à saúde de acordo com os tecidos, sejam eles do sistema nervoso central (SNC) ou do sistema nervoso periférico (SNP), dependendo da gama de frequência (f).

A Tabela 1 apresenta os limiares para os campos elétricos induzidos no interior do corpo humano, causados pela exposição à campos eletromagnéticos externos, categorizados para a exposição ocupacional e a exposição do público em geral em relação à frequência. Por exemplo, para frequências na faixa de 10 a 25 Hz, é necessário que a exposição ocupacional seja limitada a campos que induzem intensidades de campo elétrico no tecido do SNC da cabeça de menos de 50 mV.m^{-1} a fim de evitar a indução de fosfenos na retina e quaisquer possíveis efeitos transitórios na função cerebral. Apesar de não serem considerados como efeitos adversos à saúde, a ICNIRP reconhece que podem ser perturbadores em certas circunstâncias ocupacionais e devem ser evitados [8].

A exposição de trabalhadores em ambientes controlados para frequências de até 3 kHz deve ser limitada a campos que induzem campos elétricos na cabeça e no corpo de menos de $800 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$, o que evita a estimulação dos nervos periféricos e centrais. Para o público em geral é aplicado um fator de 5 para frequências entre 10 e 25 Hz, o que resulta em uma restrição de $10 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$. Para valores de frequência abaixo de 10 Hz e acima de 25 Hz as restrições básicas aumentam [8].

Tabela.1- Limitações básicas para exposição de seres humanos a campos magnéticos e elétricos variáveis ao longo do tempo [8].

Características da exposição	Gama de frequências	Campo elétrico interno (V m^{-1})
Exposição ocupacional		
Tecido do SNC da cabeça	1-10 Hz	$0.5/f$
	10 Hz-25 Hz	0.05
	25 Hz-400 Hz	$2 \times 10^{-3}f$
	400 Hz-3 kHz	0.8
	3 kHz-10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
Todos os tecidos da cabeça e do corpo	1 Hz-3 kHz	0.8
	3 kHz-10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
Exposição do público em geral		
Tecido do SNC da cabeça	1-10 Hz	$0.1/f$
	10 Hz-25 Hz	0.01
	25 Hz-400 Hz	$4 \times 10^{-3}f$
	400 Hz-3 kHz	0.4
	3 kHz-10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}f$
Todos os tecidos da cabeça e do corpo	1 Hz-3 kHz	0.4
	3 kHz-10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}f$

Com base nos limiares de campo induzido no organismo humano, a ICNIRP então, foi capaz de determinar os níveis de campos máximos que um indivíduo pode ser submetido como mostrado nas Tabelas 2 e 3, do público geral ou ocupacional, respectivamente. Os níveis foram determinados para condições em que a variação do campo elétrico ou magnético sobre o espaço ocupado pelo corpo é relativamente pequena. Porém, na maioria dos casos, a distância da fonte é tão próxima do indivíduo, que a distribuição do campo sobre a superfície do corpo é não uniforme ou localizada apenas em uma pequena parte do corpo. Nestes casos, a medição da

força de campo máxima na posição do espaço ocupado pelo corpo sempre resulta em uma avaliação de exposição segura, apesar de muito conservadora [8].

Tabela.2- Níveis de referência para a exposição ocupacional a campos eletromagnéticos variáveis ao longo do tempo (valores rms de campo não perturbado) [8].

Gama de frequências	Intensidade do campo eléctrico E (kV m ⁻¹)	Intensidade do campo magnético H (A m ⁻¹)	Densidade do fluxo magnético B (T)
1 Hz-8 Hz	5	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz-25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 Hz-50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50 Hz-400 Hz	$2.5 \times 10^2/f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400 Hz- 3 kHz	$2.5 \times 10^2/f$	$6.4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz-10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

Tabela.3- Níveis de referência para a exposição do público em geral a campos eléctricos e magnéticos variáveis ao longo do tempo (valores rms de campo não perturbado) [8].

Gama de frequências	Intensidade do campo eléctrico E (kV m ⁻¹)	Intensidade do campo magnético H (A m ⁻¹)	Densidade do fluxo magnético B (T)
1 Hz-8 Hz	20	$1.63 \times 10^5/f^2$	$0.2/f^2$
8 Hz-25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^{-2}/f$
25 Hz-300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz-3 Hz	$5 \times 10^2/f$	$2.4 \times 10^5/f$	$0.3/f$
3 kHz-10 MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}

Os níveis de referência apresentados aproximam uma combinação dos campos induzidos no SNC e no SNP em qualquer parte do corpo. Para exposição ocupacional, o nível de referência de campo eléctrico de até 25 Hz inclui uma margem para que os efeitos de estimulação das correntes de contato sejam evitados. Para frequências entre 25 Hz e 10 MHz, os níveis de referência adotados baseiam-se apenas na restrição básica para campos eléctricos induzidos e podem, portanto, não fornecer uma margem suficiente para evitar efeitos de estimulação de correntes de contato em todas as condições possíveis para esta faixa de frequência. Para o público em geral, os níveis de referência para o campo eléctrico até 10 MHz

evitam efeitos indiretos, como queimaduras e choques, para mais de 90% dos indivíduos expostos. Os níveis adotados para frequências até 50 Hz incluem uma margem suficiente para evitar os efeitos da carga elétrica de superfície, como a percepção da maioria das pessoas [8].

Com base nas informações acima, a ANEEL, regulamentou os níveis de campos elétrico e magnético em instalações de 50 e 60 Hz, como mostrado na Tabela 4 [10].

Tabela.4- Níveis de Referência de Campos Elétrico e Magnético [10].

	Instalações em 50 Hz		Instalações em 60 Hz	
	Campo Elétrico [kV.m ⁻¹]	Campo Magnético [μT]	Campo Elétrico [kV.m ⁻¹]	Campo Magnético [μT]
Público Geral	5	200	4,17	200
População Ocupacional	10	1000	8,33	1000

2.2 Linhas de transmissão aéreas

As Linhas de transmissão (LT) são as responsáveis pelo transporte da energia entre os centros de produção aos centros de consumo em um sistema elétrico. As LTs possuem propriedades diferentes de acordo com o nível de tensão, frequência, potência transmitida e comprimento. Outra característica das linhas de transmissão é o modo de estabelecimento, podendo ser subterrâneo ou aéreo, como abordado neste trabalho.

As LTs aéreas são compostas principalmente por condutores, cabos de guarda, isoladores, ferragens e estrutura. Segundo Fuchs [11], os condutores ideais são aqueles que apresentam alta condutibilidade elétrica, baixo custo, boa resistência mecânica para garantir integridade mecânica à linha, continuidade no serviço e segurança, baixo peso e alta resistência à corrosão e oxidação produzida por poluentes. Os condutores podem ser de cobre ou alumínio, sendo o último mais utilizado em suas derivações (alumínio com alma de aço, ligas de alumínio...) devido ao seu baixo custo em relação ao cobre.

Para o transporte de altas correntes, podem ser utilizados feixes de cabos por fase, permitindo o transporte de alta potência sem o aumento da tensão, controlando assim o efeito corona.

Os isoladores e ferragens são responsáveis por suspender os condutores isolando-os das estruturas, sendo capazes de resistir a esforços mecânicos (forças da ação do vento, peso do cabo) e elétricos (oriundos de sobretensões). Os cabos de guarda têm a capacidade de

interceptar descargas de origem atmosférica e descarregá-las para o solo, mantendo assim a integridade da transmissão intacta.

As estruturas são responsáveis pela sustentação dos cabos. Suas dimensões dependem de alguns fatores, como disposição dos condutores e distância entre eles ao longo da estrutura, flechas dos condutores, altura de segurança e número de circuitos entre outros.

O vão entre as estruturas é definido a partir do esforço que os cabos exercem sobre a estrutura e a altura mínima do cabo em relação ao solo, definida pela curvatura do cabo, conhecida como flecha, demonstrado na Figura 2.

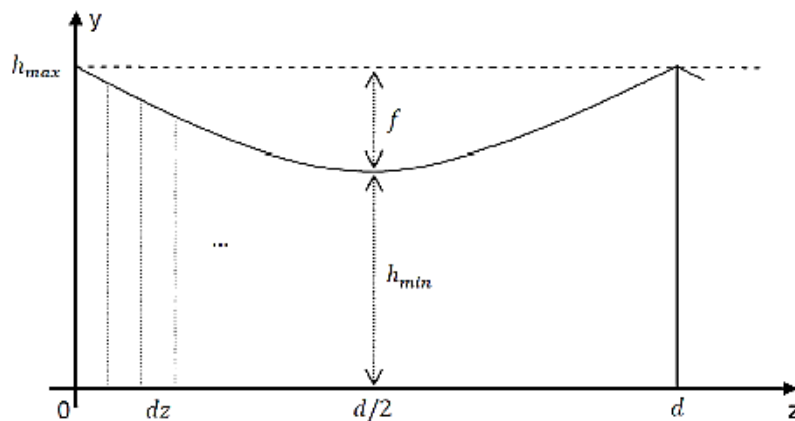


Figura.2 - Variação da altura ao longo de um vão. Parâmetros da catenária [12].

A fim de proteger indivíduos e o próprio empreendimento, é necessário definir uma faixa de servidão ao longo do eixo transversal da LT, que deve atender a alguns critérios definidos por normas, como os limites definidos na seção anterior para a proteção contra CEM.

2.3 Métodos de Cálculo

Para o cálculo dos campos eletromagnéticos para linhas de transmissão de alta tensão, são apresentados três métodos principais na literatura [24]:

- Método das Diferenças Finitas (MDF);
- Método dos Elementos Finitos (MEF);
- Método de Simulação de Cargas (MSC).

Para a utilização do MDF e MEF, é necessário limitar uma região na qual os potenciais elétricos devem ser conhecidos. Como solução, a região é dividida em sub-regiões. Cada sub-região é adotada como sendo eletricamente homogênea, apesar das propriedades variarem de

sub-região para sub-região. A equação de Laplace de cada sub-região é aproximada através de uma equação algébrica linear que relaciona os potenciais desconhecidos das sub-regiões com os potenciais dos limites conhecidos. Nem sempre os dados são facilmente obtidos, o que leva ao uso frequente do MSC [24].

Singer, Steinbigles e Weiss [25] propuseram o MSC como um método numérico, no qual através de cargas fictícias localizadas no centro do condutor, as cargas superficiais nos condutores são representadas, sem perder a precisão dos resultados. Neste trabalho foi adotado o MSC para o cálculo dos campos eletromagnéticos, assim como os casos utilizados para validação do algoritmo, e o método será explorado nas seções a seguir.

2.4 Método de Cálculo dos campos eletromagnéticos

2.4.1 Campo Elétrico

A interação entre duas cargas carregadas, gera uma força elétrica ocasionada por um campo elétrico ao redor das cargas. A intensidade do campo elétrico pode ser determinada pela Lei de Coulomb ou pela Lei de Gauss, de acordo com a aplicabilidade mais indicada.

2.4.1.1 Lei de Coulomb

Por meio de experimento, Charles-Augustin de Coulomb (1736-7806) verificou que para cargas puntiformes, isto é, cargas separadas por uma distância superior ao tamanho das mesmas, a força entre elas é inversamente proporcional ao quadrado da distância e diretamente proporcional ao produto das duas cargas, conforme a seguinte expressão [26]:

$$\vec{F}_{21} = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \hat{r} \quad (3)$$

onde,

\vec{F} é a intensidade da força eletrostática [N];

q_1 a carga elétrica [C];

q_2 a carga de prova [C];

r a distância entre as cargas [m].

k a constante de proporcionalidade [N.m²/C²] que pode ser escrita como;

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (4)$$

Onde,

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

De acordo com [26], quando existem mais de duas cargas elétricas próximas, as interações entre elas se superpõem, isto é, a força que atua sobre cada carga é a resultante da soma vetorial de cada força aplicada sobre ela. Tal princípio é conhecido como o princípio da superposição e é dado por:

$$\vec{F} = \sum_{j \neq i} \vec{F}_{(j)} = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j \neq i} \frac{q_j}{r_{ij}^2} \hat{r}_{ij} \quad (5)$$

Ao movimentar uma carga q_j ao redor de uma carga q_i fixa, percebe-se um campo de força atuando sobre q_j produzido por q_i . Com isso, a equação (3) pode ser escrita em função da unidade de carga, denominada intensidade de campo elétrico (\vec{E}), dada pela Lei de Coulomb como [7]:

$$\vec{E}_i = \frac{\vec{F}_{ji}}{q_i} \quad (6)$$

Para o cálculo do campo elétrico produzido por um fio considerado infinitamente longo, adota-se que a carga está distribuída uniformemente ao longo de uma linha reta, gerando assim um campo elétrico homogêneo ao seu redor [26].

Com o uso da Lei de Coulomb, é preciso considerar a distribuição de carga dq para o cálculo dos campos elétricos, determinar cada componente e depois somá-las a fim de encontrar o valor final, seguindo com a integração dos elementos ao longo de todo o objeto. Com o objetivo de simplificar os cálculos, utiliza-se da Lei de Gauss para o cálculo do campo elétrico produzido por linhas de transmissão.

2.4.1.2 Lei de Gauss

Sabe-se que o fluxo elétrico que passa por uma determinada superfície representa o campo elétrico total que passa pela mesma. Sendo assim, a Lei de Gauss permite relacionar o campo elétrico em pontos de uma superfície fechada à carga total envolvida, como mostrado na equação abaixo [26]:

$$\phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{env}}{\epsilon_0} \quad (7)$$

onde:

ϕ é o fluxo de campo elétrico [N.m²/C];

q_{env} carga total envolvida pela superfície gaussiana fechada fictícia A [C];

ϵ_0 a permissividade elétrica do vácuo \cong ar ($8,85 \cdot 10^{-12}$) [C²/N.m²]

Para o cálculo, é necessário que a carga emissora tenha uma simetria, seja ela esférica, cilíndrica, entre outras, para que assim seja possível traçar a superfície gaussiana. No caso de fios condutores, a simetria adotada é a cilíndrica, como mostrado na Figura 3.

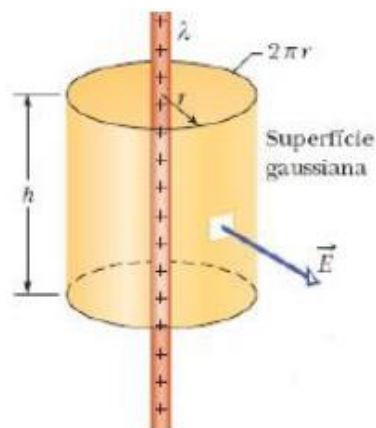


Figura.3– Superfície Gaussiana de simetria cilíndrica em um fio condutor [15].

Através da simetria adotada, sabe-se que as linhas do campo elétrico de um fio retilíneo uniformemente carregado são radiais e perpendiculares ao fio, podendo ser descrito por [26]:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \hat{r} \quad (8)$$

onde:

λ é a densidade linear de carga [C/m];

2.4.1.3 Campo elétrico em Linhas de Transmissão

O cálculo do campo elétrico em linhas de transmissão se dá com a utilização de dois métodos: método das imagens e o método de simulação de cargas. Inicialmente, é necessário que a distribuição real das cargas contidas na superfície dos condutores seja substituída por uma

distribuição fictícia obtida através do potencial elétrico instantâneo de cada fase. A partir das cargas calculadas, o campo elétrico é encontrado através da Lei de Gauss.

Através do método de simulação de cargas, o campo elétrico gerado pelas linhas de transmissão é realizado em duas etapas [16]:

1. Cálculo da carga equivalente por unidade de comprimento no condutor;
2. Cálculo do campo elétrico produzido.

É necessário se adotar algumas premissas para simplificações do cálculo do campo elétrico em duas dimensões. Tal simplificações, porém, conduzem a valores mais elevados que os reais [17]:

- As cargas devem ser consideradas como distribuídas de maneira uniforme sobre o cabo;
- A superfície do solo tem potencial nulo;
- Os campos elétricos não são influenciados pelas torres.

Como dito anteriormente, é necessário representar os potenciais entre as fases e a terra como cargas distribuídas uniformemente nos condutores das fases. As cargas são obtidas através da multiplicação da matriz de capacitâncias próprias e mútuas, encontrada por meio do método das imagens, pela matriz de potenciais.

O solo possui influência sobre a capacitância da LT, influenciando assim o campo elétrico gerado pela mesma. É através do método das imagens que essa influência é analisada e considerada nos cálculos. Adotando o solo como um condutor ideal ($\sigma = \infty$) representado como um plano equipotencial nulo, é possível considerar um condutor imagem de carga igual ao da linha, porém a uma profundidade em relação ao solo igual à altura do cabo condutor, porém de sinal oposto, como demonstrada na Figura 4.

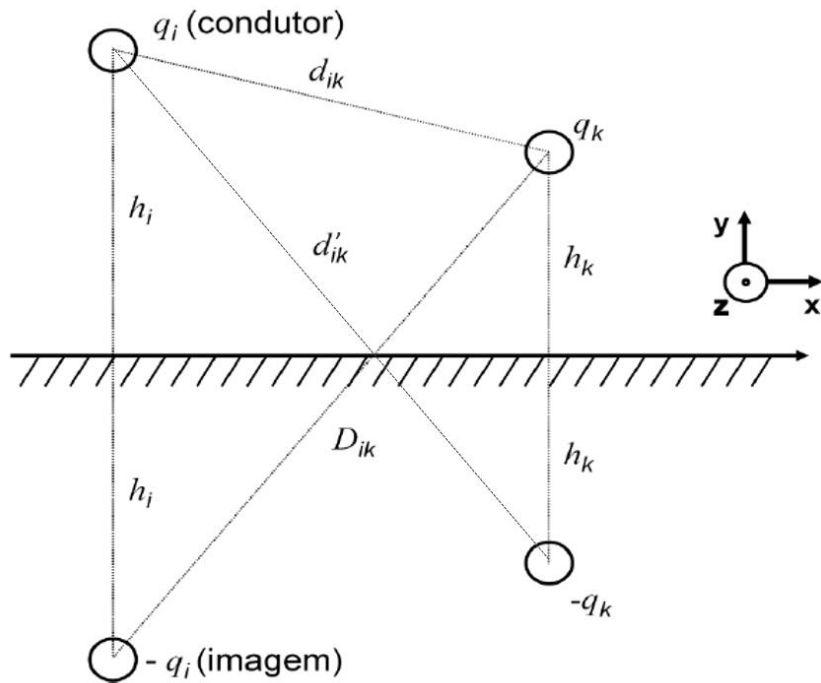


Figura.4– Diagrama para o cálculo dos coeficientes de potencial [17].

Para que as cargas possam ser determinadas, é necessário que n pontos de teste sejam estabelecidos na superfície do condutor. O valor calculado será interpretado como densidade linear de cargas, determinados por:

$$[Q] = [P]^{-1} \cdot [V] \quad (9)$$

Na equação 9, a matriz $[Q]$ representa as densidades de carga em coulomb por metro (C/m), $[V]$ representa o potencial elétrico entre os condutores e o solo expressas nas formas fasoriais em volts (V) e $[P]$ a matriz dos potenciais de Maxwell, em metros por Farad (m/F), calculados por meio de:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad (10)$$

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{ik}}{d_{ik}}\right) \quad (11)$$

sendo:

i e k condutores de uma LT;

ϵ_0 a permissividade elétrica do vácuo \cong ar ($8,85 \cdot 10^{-12}$) [F/m];

h_i a altura do condutor em metros [m];

d'_{ik} a distância entre o condutor i e a imagem do condutor k em metros [m];

d_{ik} a distância entre o condutor i e o condutor k em metros [m];

r_i o raio do condutor em metros [m].

Para linhas de transmissão em que as fases são compostas por feixes de subcondutores (mais de um cabo por fase), o raio equivalente é calculado por [16]:

$$r_{eq} = (mrR^{m-1})^{\frac{1}{m}} \quad (12)$$

onde:

m é o número de subcondutores;

r raio de um subcondutor do feixe[m];

R o raio geométrico do feixe exemplificado na Figura 5 [m].

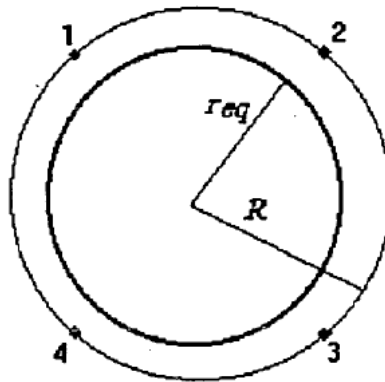


Figura.5– Raio equivalente de um feixe geminiano [16].

Após o cálculo das cargas equivalentes, a intensidade do campo elétrico pode ser calculada por meio do teorema de Gauss. O campo resultante em um ponto P genérico, com coordenadas x_o e y_o é representado pelo somatório das contribuições de cada condutor e de suas imagens, pela equação 13.

$$E_{total} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (13)$$

Os campos E_x e E_y são determinados, respectivamente, por:

$$E_x = \frac{\lambda_c}{2\pi r \epsilon_0} \left(\frac{x_o - x}{r_{oc}} - \frac{x_o - x}{r'_{oc}} \right) \quad (14)$$

$$E_y = \frac{\lambda_c}{2\pi r \epsilon_0} \left(\frac{y_o - y}{r_{oc}} - \frac{y_o - y'}{r'_{oc}} \right) \quad (15)$$

Sendo r_{oc} e r'_{oc} , respectivamente, a distância do condutor ao ponto de prova (x_o, y_o) e a distância do ponto de prova ao condutor imagem.

2.4.2 Campo Magnético

Como visto no tópico anterior, o campo elétrico é definido através da força elétrica $F = qE$ que atua sobre uma carga de prova puntiforme em repouso. O campo magnético, porém, é definido pela força que atua sobre uma carga em movimento ou uma corrente [14]:

$$\vec{F}_m = |q| \vec{v} \times \vec{B} \quad (16)$$

Podendo ser reescrita como:

$$F_m = |q| v B \text{sen } \alpha \quad (17)$$

sendo,

F_m a força magnética entre o campo e a carga em velocidade [N];

v velocidade das partículas [m/s];

B o campo magnético [T];

α ângulo entre os vetores \vec{v} e \vec{B} .

Analisando a equação 17, nota-se que a força magnética F_m é diretamente proporcional à carga q e à sua velocidade v . Sendo assim se a carga for nula e/ou a velocidade é zero, ou seja, se a carga está parada, a força magnética atuante sobre a mesma é nula. Outro ponto a se observar, é que a força magnética também é proporcional ao produto vetorial entre a velocidade e o campo magnético. Como característica do produto vetorial tem-se que a força será sempre perpendicular aos vetores \vec{v} e \vec{B} e se o ângulo entre eles for nulo ($\text{sen}(0) = 0$), ou seja, se os vetores forem paralelos, a força também será nula.

A corrente que percorre um fio pode ser definida como a carga que passa por um ponto por uma unidade de tempo, cuja a unidade de medida é coulombs por segundo, ou ampère (A). Seja a carga denotada como uma densidade de carga λ deslocada em fio com velocidade v , a corrente pode ser denotada como um vetor por [18]:

$$I = \lambda v \quad (18)$$

Logo, a força magnética pode ser definida em função da corrente por:

$$\vec{F}_m = \int (\vec{v} \times \vec{B}) dq = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \lambda dl = \int I (\vec{dl} \times \vec{B}) \quad (19)$$

2.4.2.1 Lei de Biot-Savart

Cargas em movimento são capazes de criar campos eletromagnéticos. A Lei de Biot-Savart busca o cálculo de campos magnéticos gerados por correntes elétricas estacionárias, ou seja, correntes de magnitudes constantes ao longo de todo o fio, como exemplificado na Figura 6. A Lei de Biot-Savart defende que o campo magnético é a integral dos campos produzidos por cada trecho ds do condutor [26].

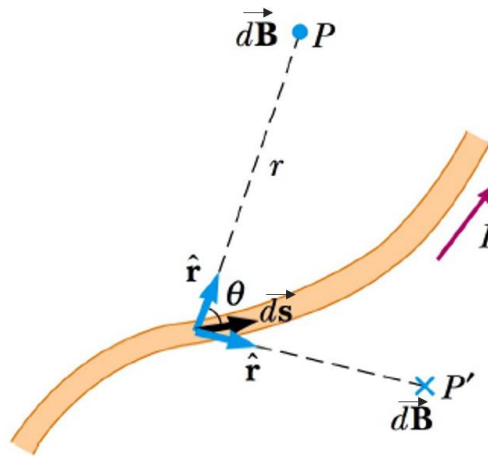


Figura.6– Lei de Biot-Savart em um fio condutor transportando uma corrente I [15].

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{(d\vec{s} \times \hat{r})}{r^3} \quad (20)$$

sendo:

\vec{B} o campo magnético gerado pelas cargas em movimento [T]

μ_o permeabilidade magnética [T.m/A]

\hat{r} vetor de direção entre o campo e o ponto de prova

r distância entre o condutor e o ponto de prova [m]

I corrente que percorre o condutor [A]

Assim como no cálculo de campos elétricos é utilizado a lei de Gauss para casos em que é possível adotar uma simetria, nos campos magnéticos utiliza-se a Lei de Ampère que será descrita na seção a seguir.

2.4.2.2 Lei de Ampère

A Lei de Ampère, diferente da lei de Gauss, não baseia a sua formulação no fluxo magnético, mas define que a integral de linha sobre um caminho fechado da densidade de fluxo magnético \vec{B} produzido por uma corrente é proporcional à corrente que passa pela superfície utilizada na integração, conhecida como amperiana [22].

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{env} \quad (21)$$

Sendo:

\vec{B} o vetor densidade de fluxo magnético [T]

$d\vec{l}$ a parte infinitesimal do caminho de integração [m]

μ_0 a permeabilidade magnética [T.m/A]

I_{env} a corrente envolvida pelo caminho traçado [A]

Para a realização do cálculo em um fio condutor através da Lei de Ampère, adota-se uma circunferência de raio r em um plano perpendicular ao fio, como demonstrado na Figura 7.

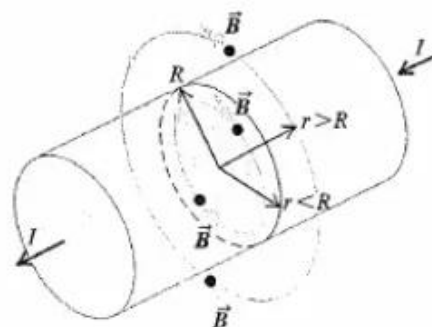


Figura.7– Lei de Ampere aplicada a um fio condutor [13].

Sabendo que o vetor \vec{B} é tangente à circunferência traçada, tem-se:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B(2\pi r) = \mu_0 I_{env} \quad (22)$$

Logo,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (23)$$

O método analítico, considera

2.4.2.3 Campo magnético em Linhas de Transmissão

Assim como no cálculo de campos elétricos em linhas de transmissão, é necessário definir algumas premissas a fim de simplificação de cálculo:

- Sendo a frequência de operação da linha considerada baixa, o campo magnético pode ser calculado separadamente do campo elétrico, numa aproximação quase-estacionária;
- A permeabilidade relativa do ar considerada é unitária. Ao considerar o solo como condutor ideal, as correntes que penetram o solo são desconsideradas, alterando o valor real do campo calculado, já que o mesmo sofre interferência das correntes de retorno por terra, necessitando assim do uso de condutores imagens como fator de correção para a presença do solo e correntes acima do mesmo [19][20];
- Os condutores imagens são considerados a uma profundidade equivalente à altura do condutor em relação ao solo, somada a uma distância p calculada por meio do método das imagens complexas de Deri, que considera um plano complexo, de condutividade infinita de retorno de corrente, conforme mostrado na equação (24) [20][21].

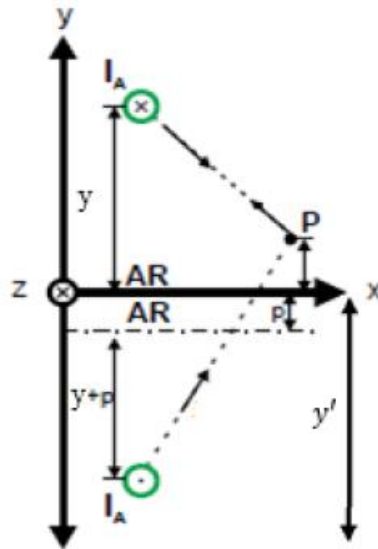


Figura.8– Método das Imagens Complexas de A. Deri para um sistema monofásico. [21]

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

sendo:

ω a frequência angular [rad/s];

μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi * 10^{-7}$ H/m);

σ_s condutividade do solo [S/m]

ϵ permissividade elétrica do solo [F/m]

Considerando as premissas anteriores, o campo magnético total produzido por uma LT calculado em um ponto de prova $P (x_o, y_o)$, como representado pela Figura 8, é dado por:

$$B_{total} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (25)$$

Utilizando a Lei de Ampère aplicada a fios condutores, tem-se:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{x_o - x}{r_{oc}} - \frac{x_o - x}{r_{oc'}} \right) \quad (26)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{y_o - y}{r_{oc}} - \frac{y_o - y'}{r_{oc'}} \right) \quad (27)$$

em que:

I é a corrente no condutor analisado;

roc é a distância entre o ponto e o condutor;

roc' é a distância do ponto ao condutor imagem.

2.5 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos e as formulações matemáticas para os cálculos de campos elétricos e magnéticos associados a linhas de transmissão através do Método de Simulação de Cargas e o Método das Imagens. Com base nestas formulações, o capítulo seguinte tem como objetivo a implementação e validação de um algoritmo em linguagem MATLAB®.

Capítulo 3

3 Implementação e sistemas em estudo

Este capítulo tem por finalidade apresentar a estrutura básica do algoritmo implementado em MATLAB® (Anexo A) para a realização dos cálculos de campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão aéreas, com base nas formulações estudadas no capítulo anterior, e a definição dos casos utilizados para a validação do software e o caso base para as análises de sensibilidade dos campos em relação à parâmetros característicos da LT.

3.1 Implementação do programa

Para a simulação dos campos eletromagnéticos, foram adotadas premissas como [2]:

- Os campos foram calculados considerando apenas as cargas nas superfícies dos condutores;
- Assumiu-se os condutores como fios infinitamente longos paralelos ao solo;
- Os cabos de guarda não foram considerados para os cálculos.
- As fases em circuitos trifásicos são equilibradas.

Inicialmente, é necessário a inserção de parâmetros característicos da LT em estudo, sendo esses:

- Tensão de operação;
- corrente nominal;
- resistividade do solo adotada;
- número de circuitos;

- número de fases (para linhas de circuito duplo trifásico, adota-se uma linha com 6 fases);
- frequência de operação (em geral 50 ou 60 Hz);
- diâmetro dos condutores e cabos de guarda;
- número de condutores por fase;
- distância entre os condutores no feixe;
- disposição dos cabos de acordo com a estrutura da LT;
- topografia do solo, quando o solo não é considerado idealmente reto;
- comprimento da faixa de servidão adotada em relação ao eixo longitudinal da LT.

Em sequência, caso a linha de transmissão seja formada por feixe de subcondutores, é necessário o cálculo do raio de um condutor equivalente, localizado no centro do feixe, através da Equação (12), que utiliza do raio e a quantidade de cabos subcondutores do feixe.

Com a inserção da tensão de operação da linha de transmissão e a corrente nominal que esta transporta, são calculadas as matrizes U e I , que representam as matrizes de tensão e corrente, de acordo com o número de circuitos, em cada fase, considerados balanceados para a simulação.

A disposição dos cabos é inserida considerando um eixo cartesiano de duas dimensões, o eixo das abscissas (x) e o eixo das ordenadas (y), que representam as distâncias horizontais e verticais, respectivamente, adotando o solo e o eixo de simetria da estrutura como o ponto $(0,0)$.

A partir da faixa de servidão ao longo do eixo x e a altura de observação inseridas, as matrizes de coordenadas dos pontos de cálculo são formadas.

Para o cálculo dos campos elétricos, é gerada a matriz de coeficientes do potencial de Maxwell, através das Equações (10) e (11). Para isso, a partir das informações de disposição dos cabos na estrutura, são calculadas as distâncias entre os cabos, assim como as distâncias entre os cabos e suas imagens. A partir da matriz de tensões, é criado o vetor potencial elétrico $[V]$. Com isso, é gerada a matriz de densidade de cargas utilizando a Equação (9).

Após o cálculo da matriz de densidade de cargas, são calculadas as contribuições de cada condutor sobre os pontos de prova, utilizando as Equações (14) e (15). Como o campo elétrico sobre cada ponto é um vetor, é necessário o cálculo da intensidade de campo elétrico resultante através da Equação (13).

Como descrito no capítulo anterior, o campo magnético é calculado por meio da Lei de Ampère. O campo magnético resultante em cada ponto de medição é um vetor, e é calculado

por meio das Equações (26) e (27). Para o cálculo, é gerada uma matriz com as distâncias entre os pontos de medição e os condutores e às suas imagens, com destaque que, diferente do campo elétrico, para o cálculo do campo magnético é considerado a correção de A. Deri, de acordo com a Equação (24) e exemplificado na Figura.8.

Tendo o valor de contribuição do campo magnético em cada direção, é calculado a intensidade de campo magnético resultante através da equação (25).

Com isso, são plotados os gráficos que demonstram a variação da magnitude do campo ao longo de toda a faixa de servidão para a altura pré-estabelecida em relação ao nível do solo. O diagrama na Figura 9 apresenta o algoritmo proposto por este trabalho.

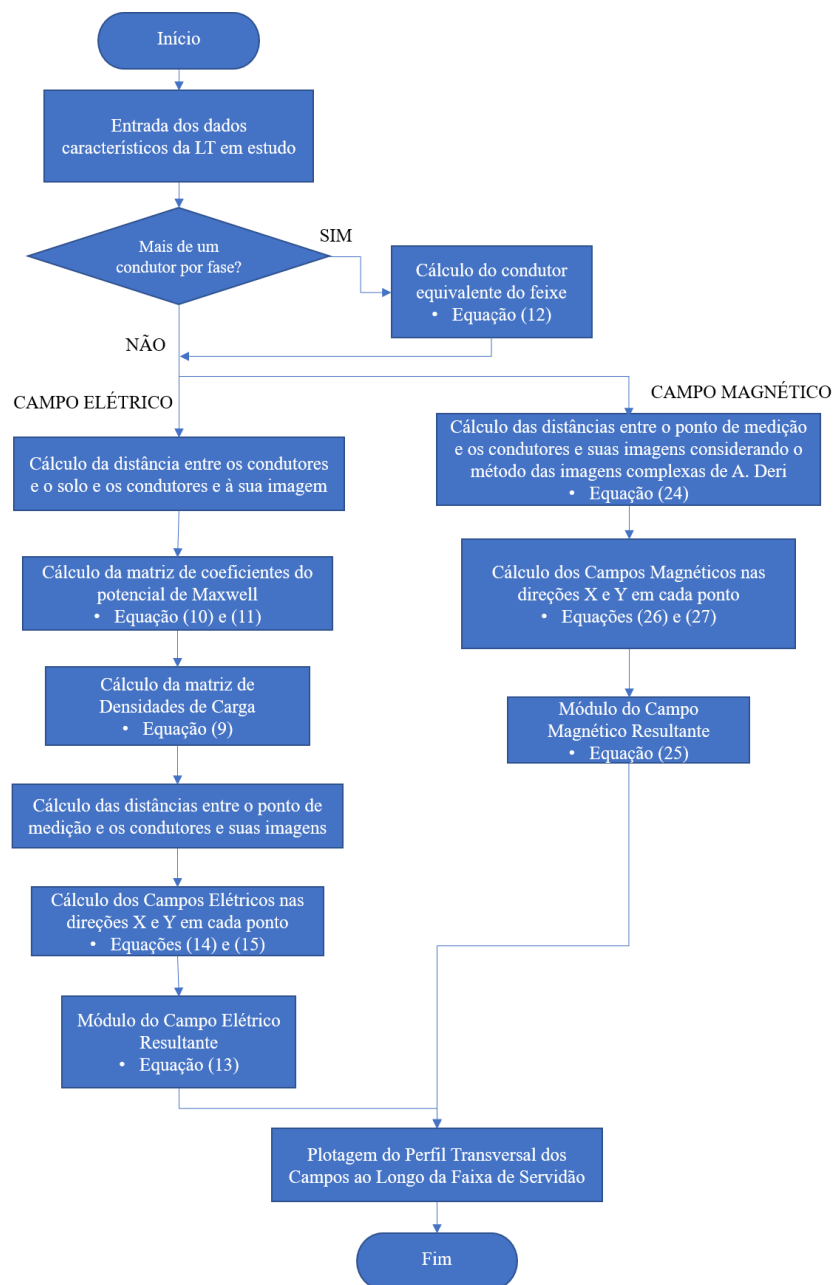


Figura.9– Fluxograma do algoritmo implementado.

3.2 Características dos sistemas em estudo

É de fundamental importância a validação dos dados obtidos em uma pesquisa baseada em simulação computacional. Para tal, utilizou-se dados divulgados na literatura de casos reais obtidos através de simulações e medições de campo.

Serão utilizados três casos de estudo para a validação. O primeiro caso, apresentado por Guimarães [1], trata de uma LT de 500 kV de circuito simples. Os outros dois casos, estudados por Freitas [22], descrevem duas linhas de transmissão de 230 kV, de circuito simples e duplo, respectivamente.

Como descrito anteriormente, é de extrema importância que os CEM estejam dentro dos padrões normativos [8][10]. Sendo assim, é necessário conhecer os campos dentro da faixa de servidão e entender o comportamento dos mesmos de acordo com o sistema. Com isso, buscase variar parâmetros como altura dos condutores em relação ao solo, distância entre os condutores, entre outros. Para tal, será utilizado um modelo característico para linhas de transmissão em 500 kV baseado em uma estrutura disponibilizada por Fuchs [6].

3.2.1 Caso 1: LT 500 kV Neves 1 – Vespasiano 2

Em [1], o autor realiza medições e simulações de campo elétrico e magnético em 40 perfis transversais de 71 pontos cada. Foi escolhido o perfil 29, que descreve o trecho da linha de menor distância entre os condutores e o solo e conseqüentemente os maiores valores de campo elétrico e densidade de fluxo magnético.

A Figura 10 apresenta a estrutura característica da LT em estudo, assim como a disposição dos cabos condutores em relação ao solo e ao eixo vertical da torre, e as Tabelas 5 e 6 as características principais para o cálculo e os dados topográficos do solo, respectivamente.

Tabela.5- Características da LT 500 kV Neves 1 – Vespasiano 2.

Nº Circuitos	1
Nº de fases	3
Nº de condutores por fase	3
Diâmetro do condutor (m)	0.02874
Espaçamentos entre condutores (m)	0.457
Distância entre Fases (m)	12
Altura Fase A (m)	11.53
Altura Fase B (m)	11.05
Altura Fase C (m)	10.86
Tensão (kV)	545.24
Corrente (A)	641.34
Resistividade do solo ($\Omega.m$)	2400

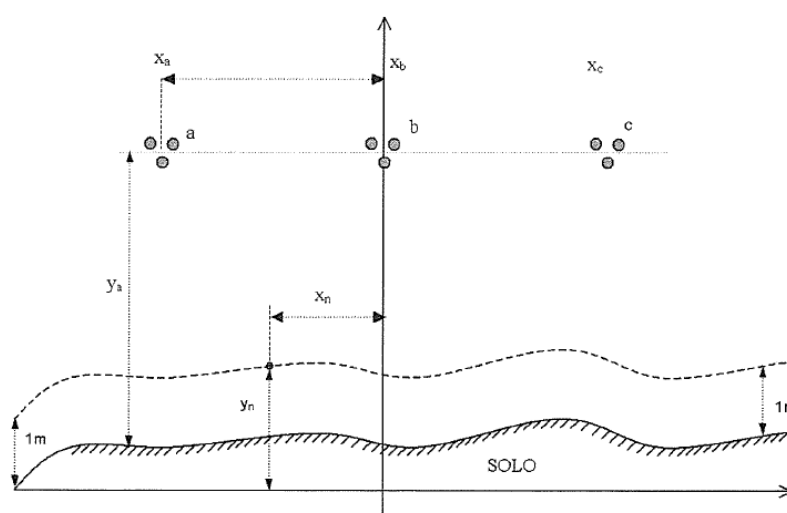


Figura.10–Estrutura característica da LT 500 kV Neves 1 – Vespasiano 2 [1].

Guimarães [1] considerou também os níveis do solo em cada perfil determinados por um estudo topográfico de campo descritos na tabela 6.

Tabela.6-Dados da topografia do solo [1].

X_n [m]	35	30	25	20	15	12	10	5	0	-5	-10	-12	-15	-20	-25	-30	-35
Y_n [m]	1.01	1	1.17	1.37	1.41	1.56	1.42	1.89	2.11	2.23	2.32	2.44	2.43	2.39	2.39	2.16	2.14

3.2.2 Caso 2: LT 230 kV Pau Ferro – Santa Rita II

Para o segundo caso de validação, utiliza-se os resultados apresentados por Freitas [22]. O autor realiza uma simulação dos CEM através de um software implementado, e compara os seus resultados com dados disponíveis em um relatório emitido pela CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco), empresa responsável pela LT utilizada.

A Figura 11 apresenta a silhueta da torre utilizada, assim como distância entre as fases e alturas em relação ao solo. A altura considerada para a simulação foi a altura mínima ao longo do vão, ou seja, a altura de flecha máxima, que é apresentada entre parênteses no detalhe.

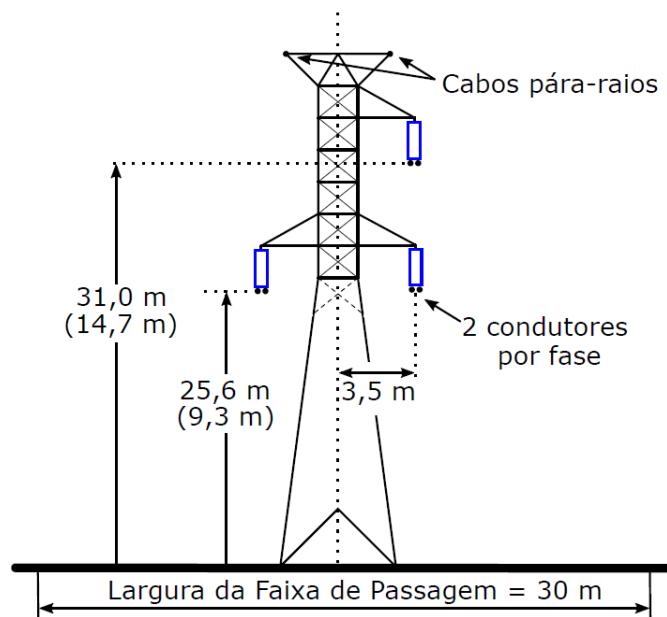


Figura.11– LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II [22].

A LT representada na Figura 11 é linha de circuito simples, de 230 kV composta por dois cabos Flint por fase. Os cabos de guarda não são considerados para a simulação. A Tabela 7 apresenta as características do sistema a ser implementado.

Tabela.7- Características LT 230 kV Pau Ferro - Santa Rita II [22].

Nº Circuitos	1
Nº de fases	3
Nº de condutores por fase	2
Diâmetro do condutor (dc) (m)	0.02516
Espaçamentos entre condutores (m)	0.45
Disposição das fases (m)	Apresentado na Figura 11

Tensão máxima (kV)	242
Corrente (A)	1882
Resistividade do solo ($\Omega.m$) (Valor adotado por escolha do autor)	2400

3.2.3 Caso 3: LT 230 kV Campina Grande II - Natal II

Como terceiro e último caso de comparação, tem-se a LT 230 kV Campina Grande II-Natal II também apresentada por Freitas [22]. Trata-se de uma LT de dois circuitos com dois cabos Grosbeak por fase. Os cabos de guarda não são considerados para a simulação. Assim como o caso 2 apresentado no tópico anterior, Freitas [22] realiza uma comparação entre os resultados do relatório da CHESF e do software proposto por ele, que serão utilizados para validação do software proposto no presente trabalho.

A disposição dos cabos de cada circuitos estão mostrados na silhueta da torre utilizada na Figura 12.

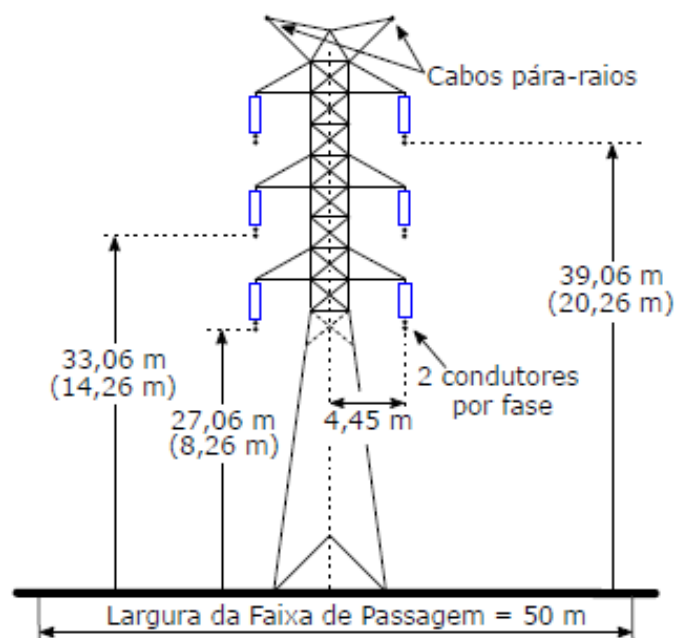


Figura.12– LT 230 kV Campina Grande II - Natal II [22].

Os demais dados de entrada dos softwares são apresentados na Tabela 8.

Tabela.8- Características LT 230 kV Campina Grande II - Natal II [22].

Nº Circuitos	2
Nº de fases por circuito	3
Nº de condutores por fase	2
Diâmetro do condutor (dc) (m)	0.02516
Espaçamentos entre condutores (m)	0.457
Disposição dos circuitos e das fases (m)	Apresentado na Figura 12
Tensão máxima (kV)	242
Corrente (A)	1594
Resistividade do solo ($\Omega.m$) (Valor adotado por escolha do autor)	2400

3.2.4 Caso 4: Caso base para as análises de sensibilidade

Primeiramente, é necessário a definição de um caso base para servir de comparativo para as variações dos parâmetros. Utiliza-se então a torre de transmissão mostrada na Figura 13, característica em LTs de 500 kV. O modelo utilizado foi baseado em uma estrutura disponibilizada por Fuchs [6]. Os campos serão medidos para um ponto de observação de 1m em relação ao solo ao longo da faixa de servidão, com x variando de -30 a 30 metros.

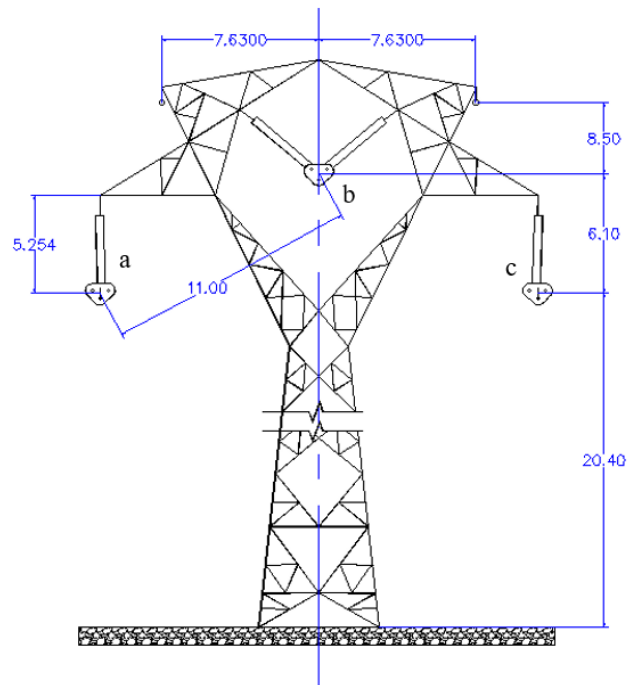


Figura.13– Estrutura considerada para o caso base.

A Tabela 9 sintetiza os parâmetros de entrada para a simulação do caso base definido. Para as simulações, os cabos de guarda foram desconsiderados.

Tabela.9- Características da LT adotada para o caso base.

Configurações do Sistema Base	
Tensão de linha (kV)	500
Potência MVA	650
Corrente (A)	750.56
Número de condutores por fase	3
Tipo de condutores fase	CAA/Rail
Número de cabos de guarda	2
Tipo do cabo pára-raio	Alumoweld 7x8
Resistividade do solo (Ω .m)	100
Distância entre os subcondutores (m)	0.457
Altura média da fase A (m)	20.4
Altura média da fase B (m)	26.5
Altura média da fase C (m)	20.4
Distância vertical entre os condutores (m)	9.154
Distância vertical entre os de guarda (m)	7.63
Altura média dos cabos de guarda (m)	35
Diâmetro dos cabos fase (mm)	29.59
Diâmetro dos cabos de guarda (mm)	9.78

Os autores em [2] e [23] destacam a influência de parâmetros nos CEM gerados pelas LTs, como:

- Altura dos condutores em relação ao solo, em que as alturas foram alteradas de maneira uniforme a cada 5 metros em relação às alturas do caso base definido, mantendo o espaçamento vertical entre os condutores;
- distância horizontal entre os condutores, variando a distância X dos condutores a e c em relação ao eixo central da linha variaram com um passo de 2 metros;
- diâmetro dos condutores variou com um acréscimo de 20% e 40% e um decréscimo de 20% em relação ao utilizado no caso base.

Capítulo 4

4 Resultados e Análises

Este capítulo tem por finalidade apresentar e analisar os resultados obtidos pelas simulações dos casos de estudo apresentados no capítulo anterior. Inicialmente, os resultados para os casos do 1 ao 3 são analisados e comparados com os obtidos por outros trabalhos a fim de validar o software. Em seguida, são apresentados os perfis transversais para o caso 4 e suas variações, e discutidos os comportamentos em cada cenário.

4.1.1 Caso 1

As simulações dos campos eletromagnéticos foram realizadas, com base nos parâmetros descritos no capítulo anterior. As Figuras 14 e 16 apresentam os resultados obtidos por meio da simulação proposta por este trabalho e as Figuras 15 e 17 os valores medidos e simulados por Guimarães [1].

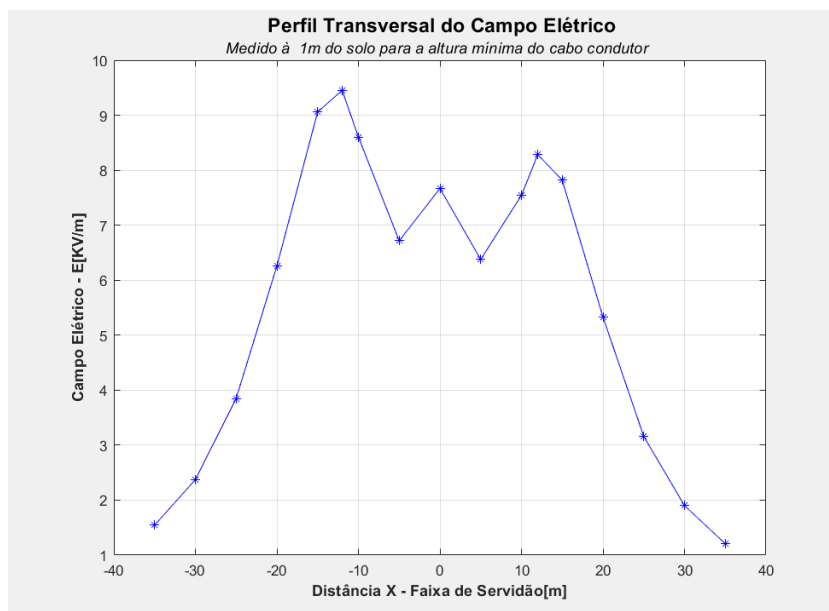


Figura.14– Perfil transversal do campo elétrico simulado para o caso 1 de validação.

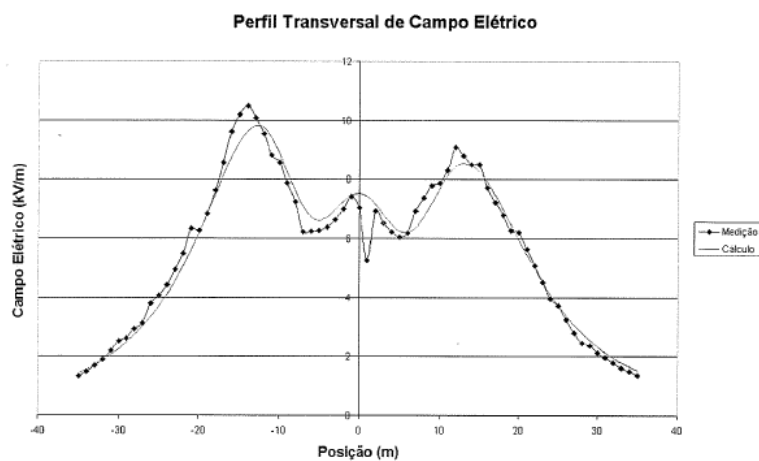


Figura.15– Perfil transversal do campo elétrico medido e calculado pela referência do caso 1 de validação [1].

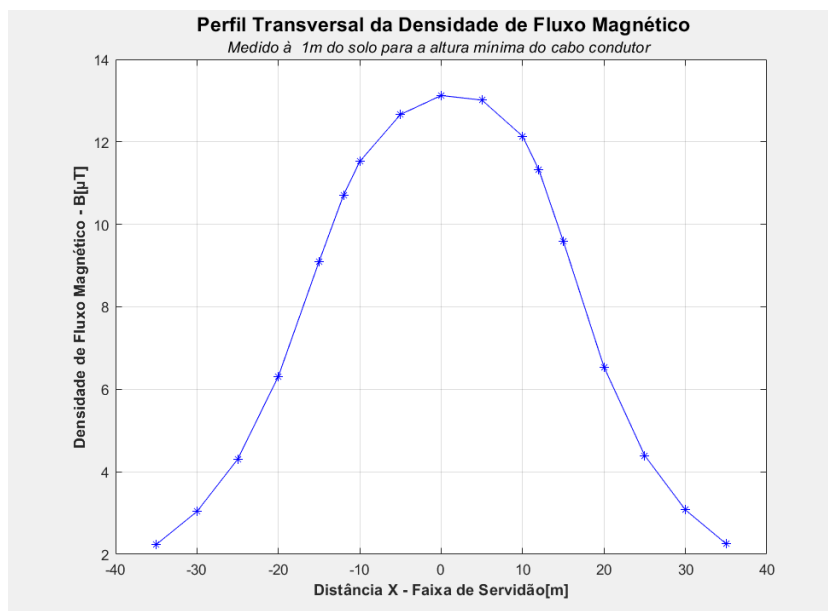


Figura.16– Perfil transversal do campo magnético simulado para o caso 1 de validação.

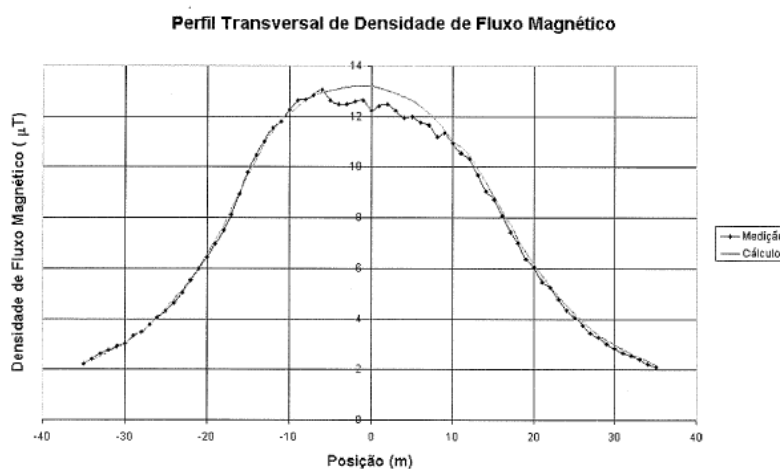


Figura.17– Perfil transversal do campo magnético medido e calculado pela referência do caso 1 de validação [1].

As tabelas 10 e 11 descrevem os valores medidos no ponto central da LT ($x=0$), nos pontos extremos da faixa de servidão ($x=\pm 30$) e os valores máximos medidos, a fim de se verificar os comportamentos do campo elétrico e da densidade de fluxo magnético no perfil em estudo. É importante ressaltar que os valores de referência citados nas tabelas são aproximados, tomando por base os valores apresentados pelos gráficos das Figuras 15 e 17.

Tabela.10-Tabela comparativa para o campo elétrico obtido no caso 1 de validação.

Posição X (m)	Campo Elétrico [kV/m]						Desvio em relação ao valor medido	Desvio em relação ao valor simulado
	Guimarães [1]				Software Proposto			
	Medido		Simulado		Simulado			
-30	2.51		2.28		2.37		5.58%	3.95%
0	7.03		7.53		7.67		9.05%	1.84%
30	2.09		2.30		1.90		9.09%	17.39%
Valor máximo Posição Valor	-13	10.50	-12	9.82	-12	9.45	9.96%	3.69%

Nos cálculos do Campo Elétrico, os valores obtidos são bastante satisfatórios. Apesar do desvio no valor aproximado de 18% em uma das extremidades da faixa de servidão devido ao fato dos valores serem baixos, necessitando de maior grau de precisão, os desvios nos demais pontos da faixa de servidão foram inferiores a 10% para as comparações em relação aos campos medidos pelo autor citado como referência e inferior a 5% para os campos calculados.

Tabela.11-Tabela comparativa para o campo magnético obtido no caso 1 de validação.

Posição X (m)	Densidade de Fluxo Magnético [μ T]						Desvio em relação ao valor medido	Desvio em relação ao valor simulado
	Guimarães [1]				Software Proposto			
	Medido		Simulado		Simulado			
-30	3.03		3.03		3.04		0.40%	0.40%
0	12.24		13.23		13.12		7.25%	0.80%
30	2.82		3.03		3.07		9.02%	1.64%
Valor máximo Posição Valor	-6	13.063	0	13.23	0	13.12	0.44%	0.83%

Para os cálculos de Densidade de Fluxo Magnético, nota-se que os desvios em relação aos valores obtidos são muito baixos, com exceção dos valores obtidos em $x=0$, que para os cálculos simulados representa o maior valor, diferente do valor medido, cujo o máximo é obtido próximo a $x = -6$.

Outro importante ponto a se considerar, é a interferência de elementos presentes nos casos reais que não são considerados no código proposto por este trabalho, que podem influenciar nos campos medidos, aumentando o desvio em relação aos valores obtidos pela simulação.

4.1.2 Caso 2:

Os resultados obtidos para o caso 2, com base nos parâmetros descritos no capítulo anterior, são apresentados pelas Figuras 18 e 19, para os CEM. Os gráficos disponibilizados pelo relatório da CHESF estão apresentados nas Figuras 20 e 22 e os resultados obtidos pelas simulações realizadas por Freitas nas Figuras 21 e 23.

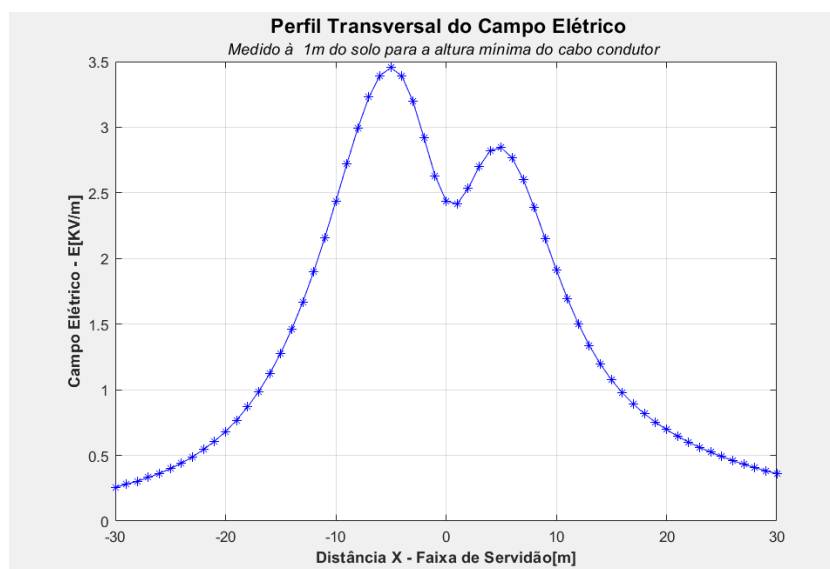


Figura.18– Perfil transversal do campo elétrico simulado para o caso 2 de validação.

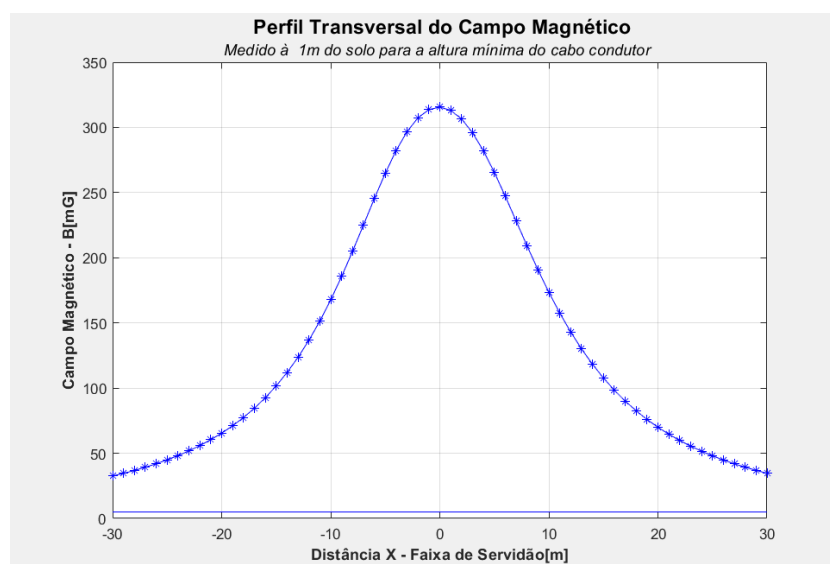


Figura.19– Perfil transversal do campo magnético simulado para o caso 2 de validação.

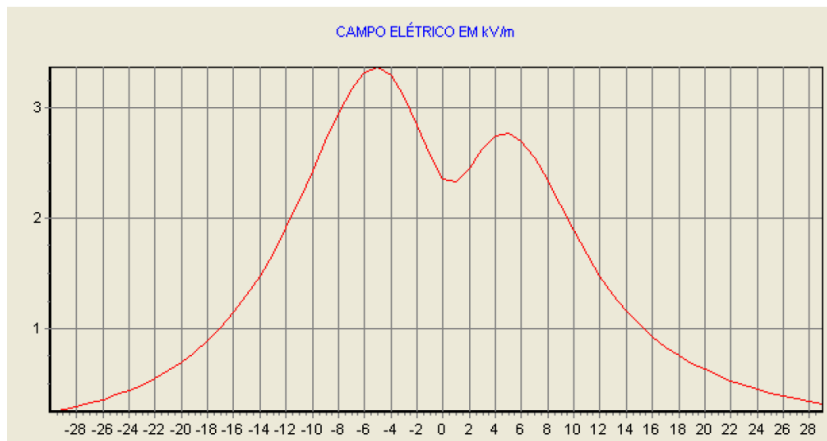


Figura.20– Perfil transversal do campo elétrico simulado por CHESF disponibilizado pela referência do caso 2 de validação [22].

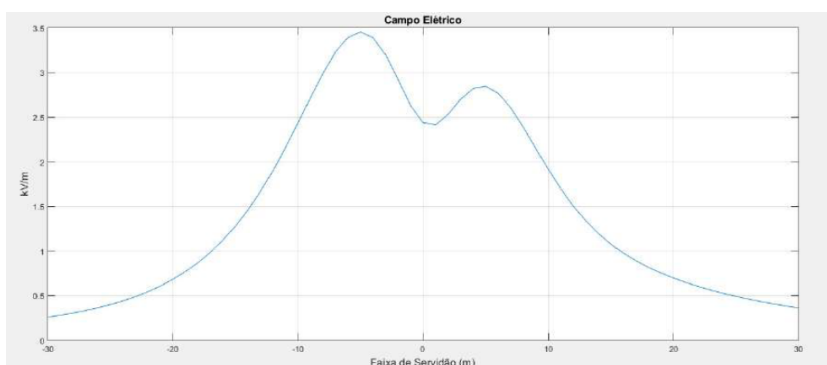


Figura.21– Perfil transversal do campo elétrico e calculado pela referência do caso 2 de validação.

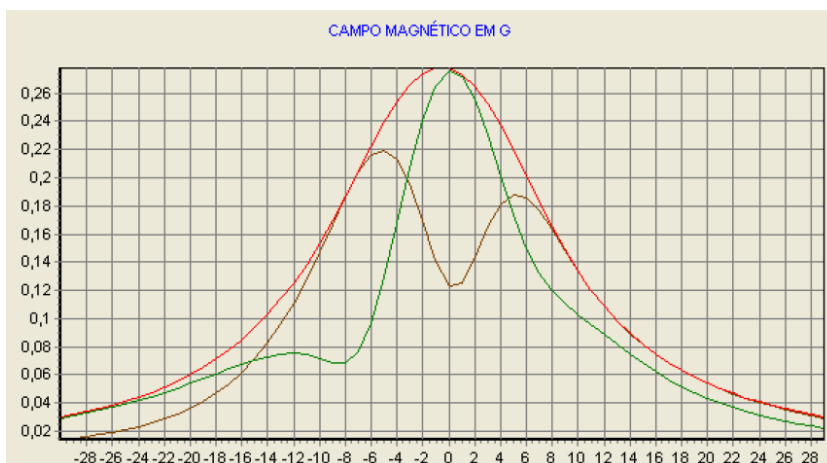


Figura.22– Perfil transversal do campo magnético simulado por CHESF disponibilizado pela referência do caso 2 de validação [22].

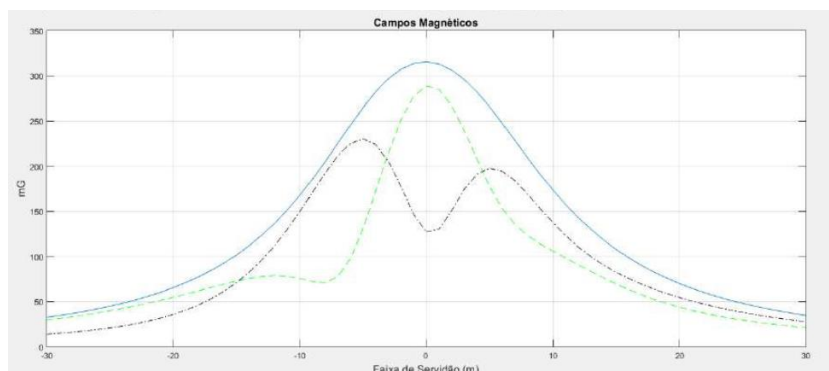


Figura.23– Perfil transversal do campo magnético calculado pela referência do caso 2 de validação.

Os resultados obtidos em ambos os casos são bastante semelhantes. Para uma melhor análise, os resultados foram sistematizados nas tabelas 12 e 13. Os valores apresentados são aproximados, já que os resultados são disponibilizados em gráficos.

Tabela.12-Tabela comparativa para o campo elétrico obtido no caso 2 de validação.

Posição X (m)	Campo Elétrico [kV/m]						Desvio em relação ao relatório	Desvio em relação ao valor simulado
	CHESF[22]		Freitas [22]		Software Proposto			
	Medido	Simulado	Simulado	Simulado				
-30	-	-	0.25	0.26	-	-	3.23%	
0	2.30	-	2.40	2.44	6.06%	-	1.64%	
30	-	-	0.37	0.36	-	-	2.31%	
Valor máximo Posição Valor	-5	3.35	-5	3.47	-5	3.45	3.10%	0.46%

Tabela.13-Tabela comparativa para o campo magnético obtido no caso 2 de validação.

Posição X (m)	Densidade de Fluxo Magnético [mG]						Desvio em relação ao relatório	Desvio em relação ao valor simulado
	CHESF[22]		Freitas [22]		Software Proposto			
	Medido	Simulado	Simulado	Simulado				
-30	30.00	-	36.00	32.53	8.45%	-	9.63%	
0	280.00	-	310.00	315.56	12.70%	-	1.79%	
30	30.00	-	38.00	34.66	15.55%	-	8.78%	
Valor máximo Posição Valor	-1	280	0	310	0	315.56	12.70%	1.79%

Analisando os resultados obtidos, verifica-se grande semelhança de comportamento entre eles, o que confirma a coerência dos resultados obtidos. Ao verificar os valores obtidos para o campo elétrico, são encontrados valores muito próximos, caracterizando pequenos desvios. Em relação ao relatório da CHESF, não foi possível comparar com exatidão os valores

próximos à faixa de servidão devido ao grau de exatidão por serem valores muito pequenos, menores que 1.

Para o campo magnético, porém, ao verificar os valores numéricos, são encontrados desvios por volta dos 10%. A maioria desses desvios são encontrados próxima à faixa de servidão, assim como para o campo elétrico, por serem valores pequenos, o que aumenta o desvio, mesmo para diferenças em casas decimais. Como todos os valores comparados são obtidos por simulação, não é possível caracterizar como desvio real.

4.1.3 Caso 3

Os resultados obtidos pela simulação são apresentados pelas Figuras 24 e 25, para os CEM, respectivamente.

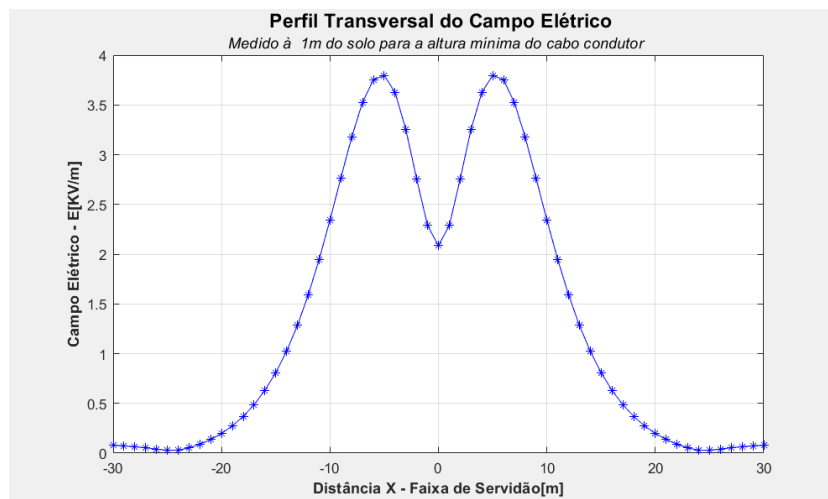


Figura.24– Perfil transversal do campo elétrico simulado para o caso 3 de validação.

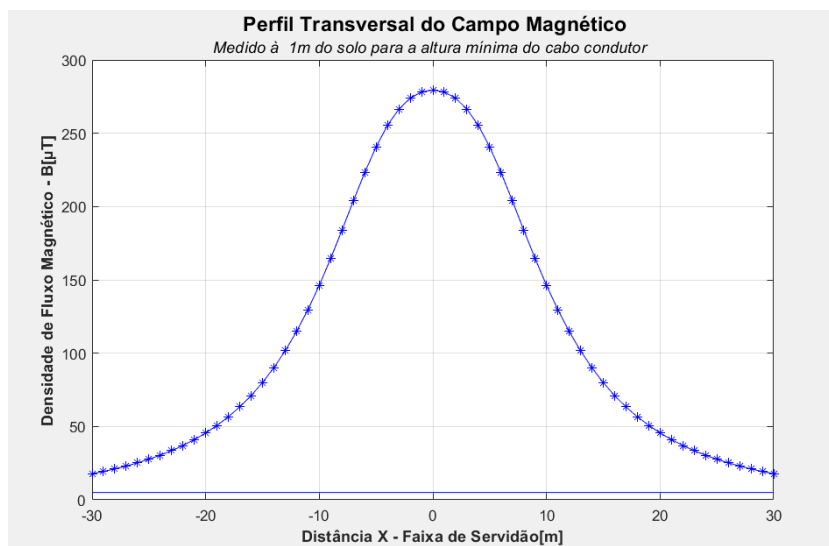


Figura.25– Perfil transversal do campo elétrico simulado para o caso 3 de validação.

As figuras 26 e 28 demonstram os resultados divulgados pela CHESF e as 27 e 29 os resultados da simulação realizada por Freitas [22].



Figura.26– Perfil transversal do campo elétrico simulado por CHESF disponibilizado pela referência do caso 3 de validação [22].

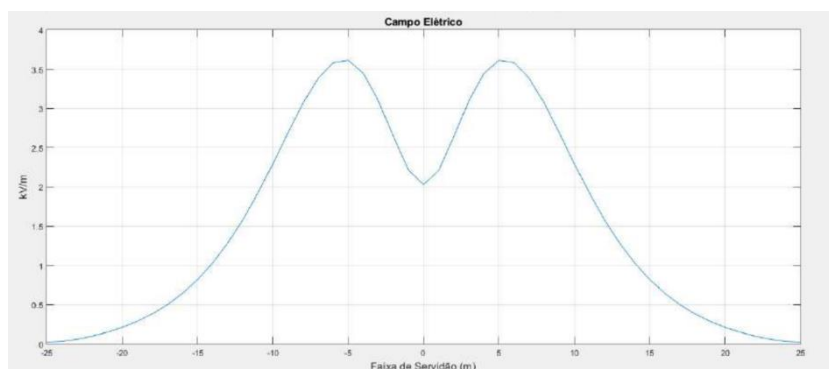


Figura.27– Perfil transversal do campo elétrico e calculado pela referência do caso 3 de validação.

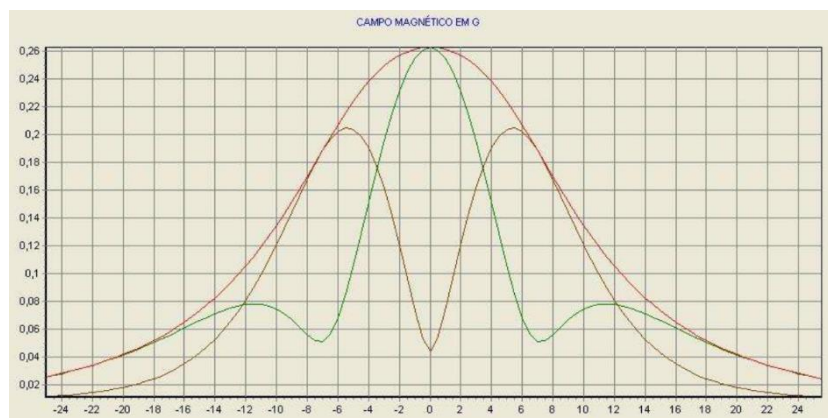


Figura.28– Perfil transversal do campo magnético simulado por CHESF disponibilizado pela referência do caso 3 de validação [22].

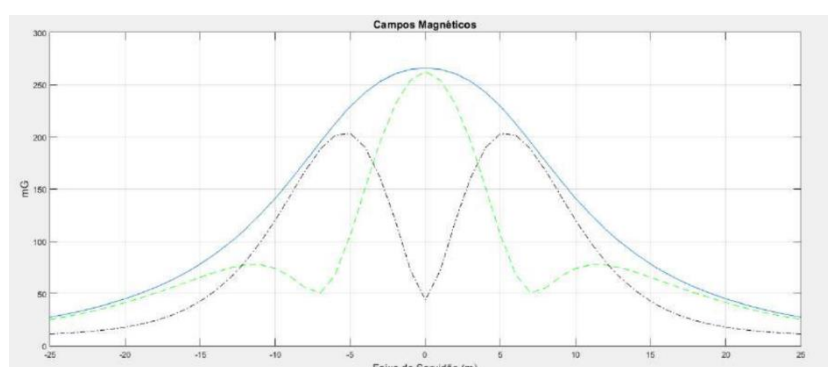


Figura.29– Perfil transversal do campo elétrico e calculado pela referência do caso 3 de validação.

Tabela.14-Tabela comparativa para o campo elétrico obtido no caso 3 de validação.

Posição X (m)	Campo Elétrico [kV/m]						Desvio em relação ao valor medido	Desvio em relação ao valor simulado
	CHESF[22]		Freitas [22]		Software Proposto			
	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado		
-20	0.21	0.22	0.22	0.20	0.20	0.20	7.04%	8.29%
0	1.85	2.03	2.03	2.09	2.09	2.09	12.73%	2.73%
20	0.21	0.22	0.22	0.20	0.20	0.20	7.04%	8.29%
Valor máximo Posição Valor	-5 5	3.74	-5 5	3.62	-5 5	3.80	1.52%	4.89%

Tabela.15-Tabela comparativa para o campo magnético obtido no caso 3 de validação.

Posição X (m)	Densidade de Fluxo Magnético [mG]						Desvio em relação ao relatório	Desvio em relação ao valor simulado
	CHESF[22]		Freitas [22]		Software Proposto			
	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado		
-20	42.00	45.00	45.00	45.57	45.57	45.57	8.50%	1.27%
0	260.00	266.00	266.00	279.00	279.00	279.00	7.31%	4.89%
20	42.00	45.00	45.00	45.57	45.57	45.57	8.50%	1.27%
Valor máximo Posição Valor	0	260	0	266	0	279	7.31%	4.89%

Após a comparação dos gráficos e a análise dos valores aproximados expostos nas tabelas 14 e 15, verifica-se alto grau de semelhança entre os dados com desvios muito pequenos, assim como os outros casos estudados. O maior desvio foi encontrado no eixo central da LT nas medições do campo elétrico, ainda assim relativamente pequeno, já que se encontra na faixa dos 12%.

Tendo como base os desvios obtidos nas validações anteriores, é possível concluir a coerência dos dados obtidos pelo software utilizado neste trabalho, sendo assim, torna-se viável a utilização do mesmo para uma análise de sensibilidade dos campos eletromagnéticos em linhas de transmissão aéreas em decorrência da variação de alguns parâmetros da LT.

4.2 Análise de sensibilidade dos campos elétricos e magnéticos em uma LT.

4.2.1 Caso Base:

A simulação foi realizada com a introdução dos parâmetros do caso 4, definido como caso base, descritos na seção 3.2.4 do capítulo anterior, no software elaborado neste trabalho e os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 30 e 31 e sintetizados nas tabelas 16 e 17 para os CEM, respectivamente.

Tabela.16- Campos elétricos obtidos ao longo da faixa de servidão para o caso base.

Distância ao eixo (m)	Campo Elétrico (kV/m)
-30	1.15
-25	1.53
-20	1.94
-15	2.22
-10	2.10
-5	1.42
0	0.75
5	1.42
10	2.10
15	2.22
20	1.94
25	1.53
30	1.15

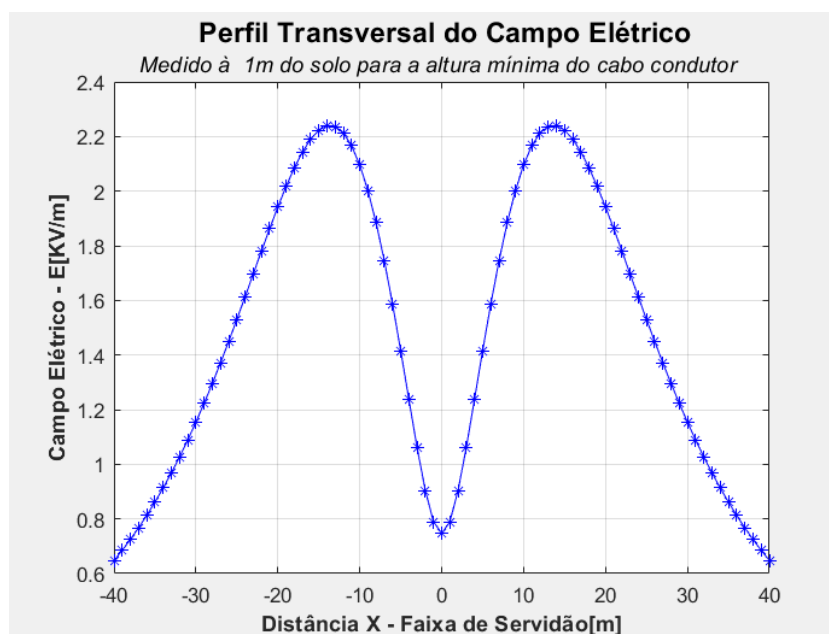


Figura.30– Perfil transversal do campo elétrico obtido para o caso base.

Sendo os condutores dispostos no mesmo plano horizontal para este caso de estudo, por meio dos resultados, verifica-se o comportamento do campo elétrico como apresentado em [2] e [23], em que os campos produzidos possuem valor máximo para regiões próximas aos condutores diminuindo em direção ao meio, devido à soma vetorial dos campos nas direções X e Y do plano cartesiano. Nota-se também que os valores decrescem a partir do valor máximo até o final da faixa de servidão, já que o campo diminui com a distância em relação à fonte, no caso, o cabo condutor.

Tabela.17- Campos magnéticos obtidos ao longo da faixa de servidão para o caso base.

Distância ao eixo (m)	Campo Magnético (μT)
-30	1.996
-25	2.509
-20	3.149
-15	3.873
-10	4.553
-5	5.026
0	5.191
5	5.027
10	4.555
15	3.874
20	3.150
25	2.510
30	1.996

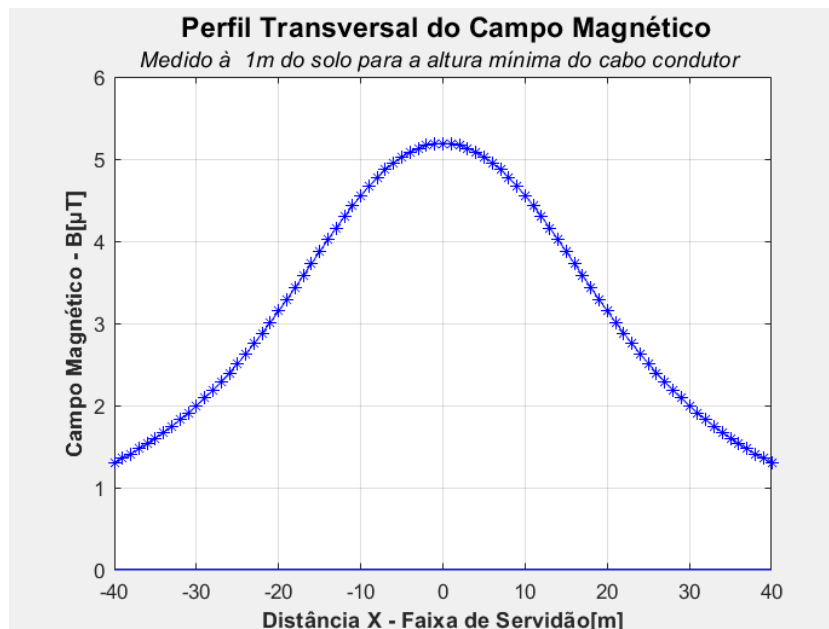


Figura.31–Perfil transversal do campo magnético obtido para o caso base.

O comportamento do campo magnético, é similar ao elétrico em relação ao decaimento ao longo da faixa de servidão a partir do eixo central, onde possui valor máximo. O campo magnético analisado é resultado da superposição dos campos magnéticos gerados por cada condutor da LT.

4.2.2 Análise de sensibilidade com a variação da altura dos condutores em relação ao solo

A fim de se estudar o comportamento dos campos em função da variação das alturas dos condutores em relação ao solo, as alturas foram alteradas de maneira uniforme, mantendo o espaçamento vertical entre os condutores.

As Figuras 32 e 33 apresentam os resultados obtidos para os campos elétrico e magnético, respectivamente, para 3 casos adicionais. As alturas médias, em relação ao nível do solo, foram alteradas através de +5, -5 e -10 metros em relação às alturas do caso base como mostra a tabela 18.

Tabela.18- Alturas médias dos condutores para a análise de sensibilidade da variação da altura média em relação do solo.

	-10 m	-5 m	Caso Base	+5 m
Altura média da fase A (m)	10.4	15.4	20.4	25.4
Altura média da fase B (m)	16.5	21.5	26.5	26.4
Altura média da fase C (m)	10.4	15.4	20.4	25.4

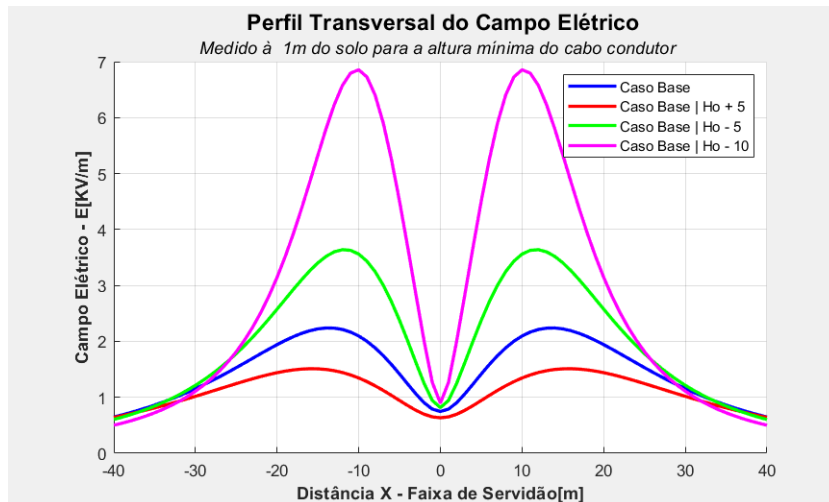


Figura.32–Comparação entre os perfis transversais do campo elétrico para a variação da altura dos condutores em relação ao solo.

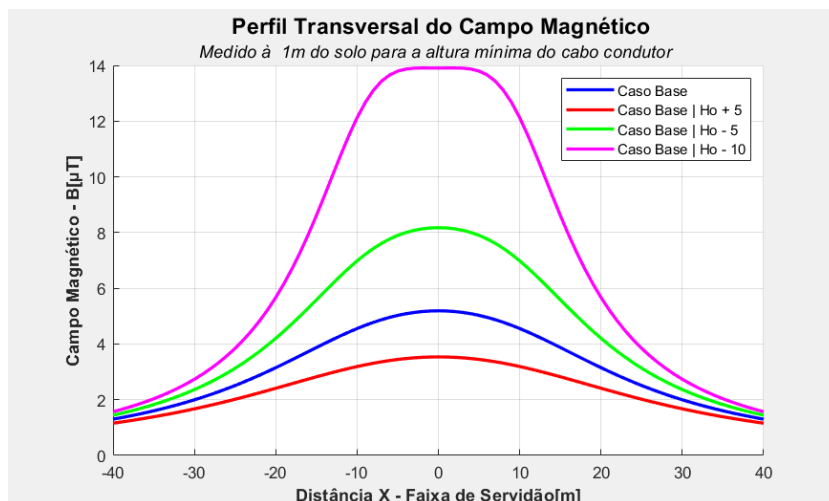


Figura.33–Comparação entre os perfis transversais do campo magnético para a variação da altura dos condutores em relação ao solo.

A partir da análise dos gráficos anteriores, é possível perceber que à medida que os cabos ficam mais próximos do solo, os campos aumentam, o que explica o fato dos maiores

valores para os campos serem encontrados nos locais onde a flecha é máxima ao longo de um vão. O autor em [2] define a altura como o parâmetro de maior influência sobre os CEM sobre o solo, porém a instalação de condutores mais altos exige estruturas maiores ou vãos menores ao longo do percurso diminuindo as flechas, o que aumentam o custo do projeto.

É possível perceber também, que para os campos elétricos, à medida que o ponto de medição se aproxima do limite da faixa de servidão adotada, os campos aumentam à medida que a altura aumenta, caracterizando um comportamento inverso à medida que se afasta da LT.

4.2.3 Análise de sensibilidade com a variação da distância horizontal entre os condutores

Para analisar a influência da distância vertical entre os condutores sobre os campos eletromagnéticos produzidos pela LT, a distância X dos condutores a e c em relação ao eixo central da linha variaram com um passo de 2 metros, e os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 34 e 35.

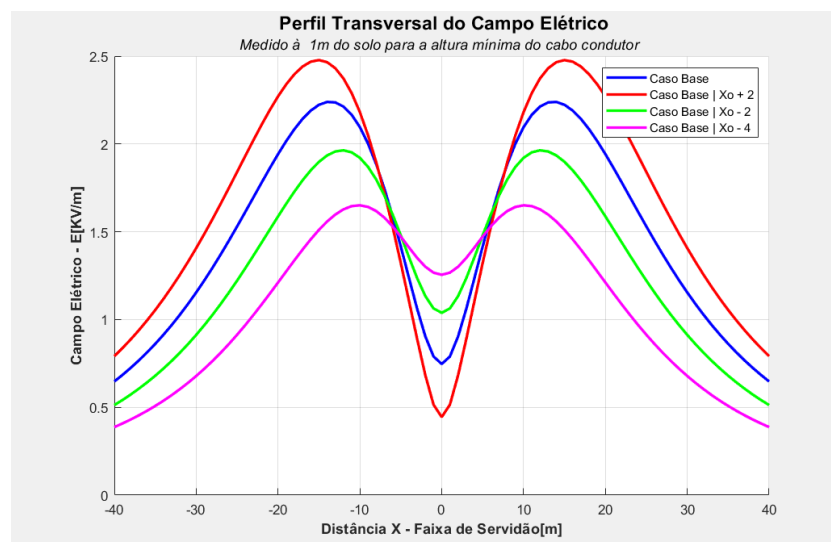


Figura.34–Comparação entre os perfis transversais do campo elétrico para a variação da distância horizontal entre os condutores.

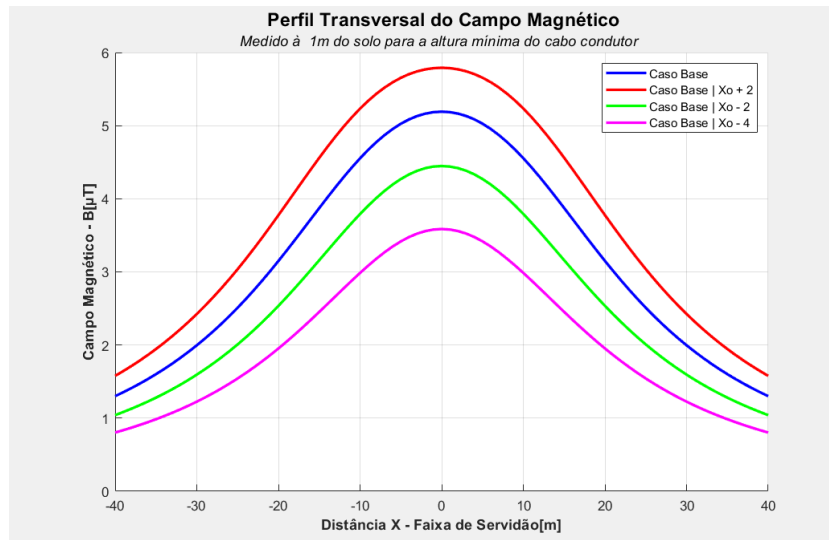


Figura.35–Comparação entre os perfis transversais do campo magnético para a variação da distância horizontal entre os condutores.

Verifica-se, a partir da análise dos gráficos nas Figuras 34 e 35, que os campos aumentam à medida que a distância entre os condutores diminui, com exceção da região próxima ao eixo central da linha para campo elétrico que aumenta com o decréscimo desta distância. Tal fato sugere um aumento na utilização de estruturas mais compactas, porém, é preciso avaliar outras considerações como efeito corona, ruído audível e radio interferência, como apresentado em [2].

4.2.4 Análise de sensibilidade com a variação do diâmetro dos condutores

Os CEM foram analisados à medida que o diâmetro dos condutores variou com um acréscimo de 20% e 40% e um decréscimo de 20% em relação ao utilizado no caso base. Os resultados podem ser analisados nos gráficos apresentados nas Figuras 36 e 37.

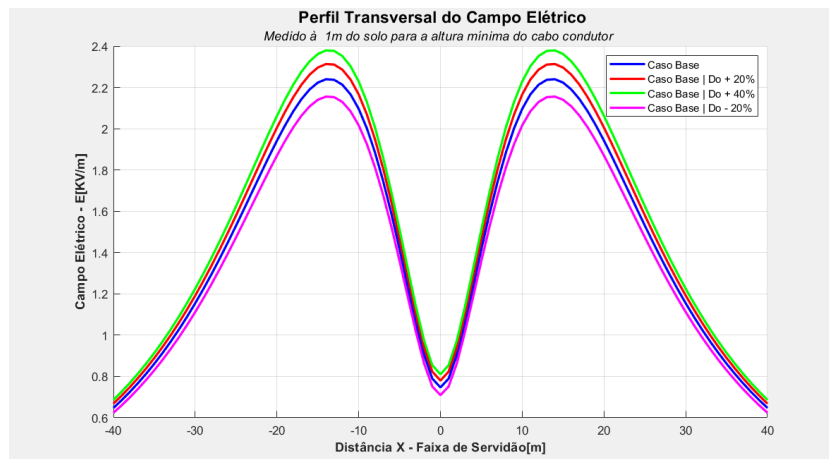


Figura.36– Comparação entre os perfis transversais do campo elétrico para a variação dos diâmetros equivalentes dos feixes dos condutores.

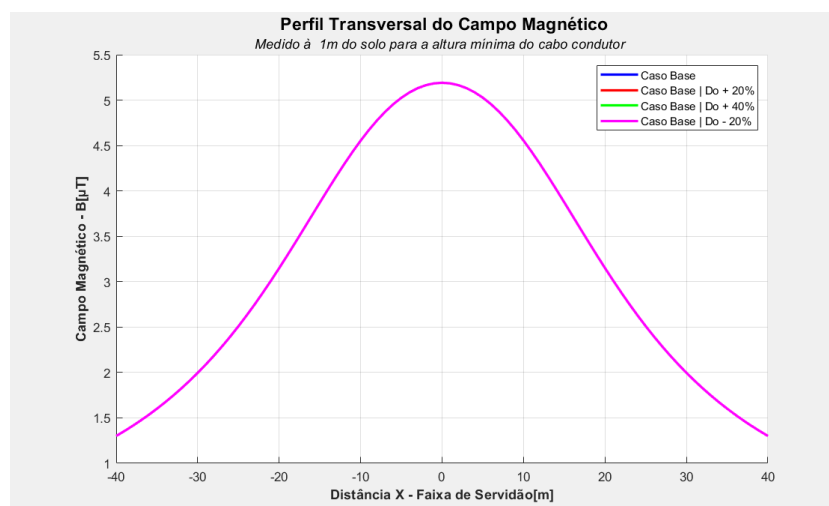


Figura.37– Comparação entre os perfis transversais do campo elétrico para a variação dos diâmetros equivalentes dos feixes dos condutores.

Sugere-se que o campo elétrico é diretamente proporcional ao diâmetro do condutor, ou seja, quanto maior o diâmetro, maior o campo elétrico, apesar de não sofrer tanta influência em relação aos casos anteriores. No gráfico apresentado na Figura 37, é possível observar a sobreposição das linhas, já que como esperado, tendo como base o equacionamento apresentado no capítulo 2, o campo magnético não sofre influência do diâmetro do condutor pois depende apenas da corrente que passa pelo mesmo.

Para a ocorrência de alterações significativas no campo elétrico, seria necessário mudanças drásticas nos diâmetros dos cabos [2], porém, a utilização de condutores menores dependente da capacidade de condução dos condutores e fatores como perda e queda de tensão adotados para o projeto, fazendo assim com que essa não seja uma alternativa atraente.

Por meio dos resultados obtidos, foi possível verificar que as linhas de transmissão em estudo cumprem os limites estabelecidos pela ANEEL. Porém, é preciso atenção ao se estabelecer as faixas de servidão, já que à medida que essa faixa é reduzida, os valores dos campos aumentam excedendo os limites estabelecidos para o público geral. Por meio das alterações dos parâmetros das linhas de transmissão é possível adequar o projeto de acordo com a necessidade, com destaque para a altura dos condutores em relação ao solo, que é o parâmetro de maior influência sobre os campos, principalmente em zonas próximas a áreas urbanas.

Capítulo 5

5 Conclusão

5.1 Conclusões Gerais

O desenvolvimento tecnológico e a demanda por energia elétrica provocaram um aumento na estrutura do sistema elétrico brasileiro. Esse aumento ocasionou uma maior preocupação sobre os efeitos dos campos eletromagnéticos em seres humanos. A fim de delimitar a interação dos campos sobre os seres humanos a curto prazo, valores máximos foram especificados através de normas o que gerou a necessidade de se calcular a magnitude dos campos gerados para garantir a segurança dos indivíduos nos arredores das instalações.

A programação implementada por este trabalho quantifica os CEM gerados por linhas de transmissão aéreas através dos métodos de simulação de cargas e método das imagens e permite uma análise dos valores ao longo da faixa de servidão pré-determinada por meio do perfil transversal.

O algoritmo foi validado para diferentes estruturas e configurações de linhas de transmissão aéreas, utilizando dados de medição e simulação realizados por outros autores disponíveis na literatura. Os desvios encontrados, em sua maioria, foram inferiores a 10%, o que verifica a veracidade e coesão dos resultados obtidos.

Por meio das simulações e análise de sensibilidade, foi possível avaliar o comportamento dos campos e concluir que:

- A altura dos condutores em relação ao solo é o fator que mais interfere nos campos sobre o ponto de medição. Quando maior a altura dos condutores, menor o campo sobre o ponto medido.
- O campo elétrico é diretamente proporcional ao diâmetro do condutor, enquanto o campo magnético não sofre interferência direta.
- Os campos diminuem à medida que o espaçamento entre as fases diminui, ou seja, quanto mais compactas são as estruturas, menores os campos, porém, outros fatores precisam ser considerados no projeto das estruturas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O software implementado neste trabalho, apesar de garantir resultados coesos e aplicáveis, possibilita melhorias e propostas de continuidade em trabalhos futuros, como:

- Elaboração de uma interface para a inserção dos parâmetros necessários para os cálculos;
- Implementação dos cálculos dos campos elétricos e magnéticos ao longo de todo o vão de uma linha de transmissão considerando a flexa e a geração de gráficos em três dimensões;
- Comportamento dos campos elétricos em linhas de transmissão com cabos isolados aéreos e subterrâneos;
- Abordagem e implementação de cálculos de outras interferências eletromagnéticas geradas por linhas de transmissão, como ruído audível e radio interferência e efeito corona;
- Aplicação de formas de mitigação dos CEM.

Referências bibliográficas

- [1] 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.
- [2] “Transmission Line Reference Book, 345kV and Above”, EPRI – Electric Power Research Institute, Second Edition, 1982.
- [3] BRITO, S. H. B. O espectro eletromagnético na natureza. Disponível em: <<http://labciso.blogspot.com.br/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html>>. Acesso em 07 de fevereiro de 2021.
- [4] OMS. Estabelecendo um Diálogo Sobre Riscos de Campos Eletromagnéticos, Genebra, 2002. 67.
- [5] Moura, A. P., Moura, A. A. F. e Rocha, E. P., Lemos H. T. Q., da Rocha, E. P., Aguiar, V. P. B., (2019). Simulador didático para análise de campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão de circuitos duplos. Fortaleza-Brasil: Revista de Enseñanza de la Física. Vol. 31, No. 2, Dic. 2019, 71–82.
- [6] Fuchs, R. D. Transmissão de Energia Elétrica. [S.l.]: LTC, v. 2, 1977b.
- [7] Velame, M. R., Cálculo dos campos eletromagnéticos da Linha de Transmissão Governador Mangabeira-Sapeaçu C1 via os métodos de simulação das cargas e das imagens. Universidade Federal Recôncavo da Bahia, 2019.
- [8] ICNIRP. Orientações para Limitar a Exposição ao tempo - Campos Elétricos e Magnéticos Variáveis (1 Hz- 100 KHz). Health Physics, v. 99, n. 6, p. 818-836, 2010.
- [9] Furtunato, C. B. V., 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. Centro Universitário do Sul de Minas. 2017.
- [10] ANEEL. Resolução Normativa nº 398, de 23 de março de 2010 [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 10.
- [11] Fuchs, R. D. Transmissão de Energia Elétrica. [S.l.]: LTC, v. 1, 1977a.
- [12] Soares, V. S.; Afonso, M. M.; Paganotti, A. L. Cálculo do Campo Magnético Originado por Linhas Aéreas de Transmissão de Energia. CEFET-MG. Juiz de Fora, p. 15. 2014.
- [13] H. D. Young & R. A. Freedman, "Física III: Eletromagnetismo, 12a. ed." Pearson, São Paulo, Brasil, 2009.
- [14] Nussenzweig, H. Moysés. Curso de física básica, S. Paulo, Vol. 3, 1997
- [15] Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. Fundamentos de Física Décima Edição - Eletromagnetismo. 10. ed. [S.l.]: LTC, v. 3, 2016.
- [16] Pinho, A. C. O Cálculo do Campo Elétrico em 2D gerado por Linhas de Transmissão e o Efeito em Seres Vivos, Florianópolis, Setembro 1994.
- [17] Matias, R. M. O método de simulação de cargas aplicado ao cálculo de campo elétrico de instalações de alta e extra alta tensão. 1999.

- [18] Griffiths, D. J., Eletrodinâmica, Pearson Education, Terceira Edição.
- [19] LOPES, A. A. Cálculo da Distribuição de Campo Elétrico e Indução Magnética em Subestações de Energia e Linhas de Transmissão, Recife, Março 2009. 144.
- [20] Vieira, H. R. Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos, São João del-Rei, Dezembro 2013. 158.
- [21] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen e A. Castanheira, "The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100, pp. 3686-3694, August 1981002E
- [22] Freitas, C. A. F. Software Baseado em MATLAB® para Cálculo e Análise Tridimensional de Campos Elétricos e Magnéticos em Linhas de Transmissão
- [23] Cowan, Charles DeHart, "Analysis and sensitivity of electromagnetic fields on high voltage transmission lines " (1980). Retrospective Theses and Dissertations. 6717.
- [24] M. Abdel-Salam and M. T. El-Mohandes, "Combined method based on finite differences and charge simulation for calculating electric fields", IEEE Transactions on IA, vol. 25, n° 6, pp. 1060-1066, November/December 1989.
- [25] SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-93, n. 5, p. 1660–1668, 1974. Citado na página 23.
- [26] NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Curso de Física básica, vol. 3, 1ª edição, São Paulo, Edgard Blucher, 1997.

Anexo A - Código de programação geral para o cálculo dos Campos Elétricos e Magnéticos em linguagem MATLAB® aplicado ao caso base.

```
clear all
clc

V = 500000; % Tensão de Linha de Operação
Vpr = 0; % Tensão no Pára-Raio
In = 750.56; % Corrente nominal
Ipr = 0; % Corrente no Pára-Raio

nckt = 1; % Número de circuitos

nf = 3; % Número de Fases

Va = (V/sqrt(3)).*(cos(0)+j*sin(0)); % Tensão da Fase A
Vb = (V/sqrt(3)).*(cos(-2*pi/3)+j*sin(-2*pi/3)); % Tensão da Fase B
Vc = (V/sqrt(3)).*(cos(2*pi/3)+j*sin(2*pi/3)); % Tensão da Fase C

Ia = In*(cos(0)+1j*sin(0)); % Corrente Fase A
Ib = In*(cos(-2*pi/3)+1j*sin(-2*pi/3)); % Corrente Fase B
Ic = In*(cos(2*pi/3)+1j*sin(2*pi/3)); % Corrente Fase C

if nckt == 1
U = [Va;Vb;Vc]; % Matriz das Tensões
I = [Ia; Ib; Ic]; % Matriz das correntes
else
U = [Va;Vb;Vc;Va;Vc;Vb]; % Matriz das Tensões
I = [Ia; Ib; Ic;Ia;Ic;Ib]; % Matriz das correntes
end
```

```

f=60; % Frequencia de operação
ps = 100; % Resistividade do solo
w = 2*pi*60; % Frequência Angular
mo = 4*pi*10^-7; % Permeabilidade Magnética
p = sqrt(ps/(j*w*mo)) % Distância complexa de A. Deri para
o campo magnético
eo = 8.854*10^-12; % Permissividade Elétrica do Ar
dcon = 29.59/1000; % Diâmetro do subcondutor
dpr = 9.78/1000; % Diâmetro do Cabo de Guarda
s = 0.457; % Espaçamento entre os condutores
n = 3; % Número de subcondutores no feixe

if n==1
    deq = dcon;
else
    R = 41.18/1000; % Raio geométrico do feixe
    deq = 2*(dcon/2^n*((R)^(n-1)))^(1/n); % Diâmetro equivalente do feixe
end

Dtot = [deq,deq,deq,0,0]; % Vetor dos diâmetros dos condutores
adotados para cada fase
fs = 40; % Faixa de Servidão adotada

%-----Disposição dos Cabos-----

x = [-9.154,0,9.154,-7.63,7.63]; % Disposição horizontal dos cabos
y1 = [20.4,26.5,20.4,35,35]; % Disposição vertical dos cabos
yp2 = [0,0,0,0,0]; % Topografia do Solo considerada na
disposição dos cabos
y=y1+yp2;
yidr = [-y(1)-2*p,-y(2)-2*p,-y(3)-2*p,-y(4)-2*p,-y(5)-2*p] % Distância do
solo à imagem do condutor considerando a distância complexa de A. Deri

%-----Ponto de Medição dos Campos-----

xn = -fs:fs; % Coordenadas X para os pontos de medição
dos campos
fsaux = 2*fs+1
yn = ones(1,fsaux); % Coordenadas y para os pontos de medição
dos campos

```

```

% -----Cálculo do Campo Elétrico-----

for j = 1:3
    for i = 1:3
        a(i,j) = ((x(i)-x(j))^2+(y(i)+y(j)-2*yp2(j))^2)^0.5
        if i == j
            P(i,j) = 1/(2*pi*eo)*log(4*y(i)/(Dtot(i)));
        else
            P(i,j) = 1/(2*pi*eo)*(log(((x(i)-x(j))^2+(y(i)+y(j))^2)^0.5)/((x(i)-x(j))^2+(y(i)-y(j))^2)^0.5))
        end
    end
end

Q = inv(P)*U; % Cálculo da Matriz de Cargas

for i = 1:nf
    for j = 1:fsaux
        roc(i,j) = ((xn(j)-x(i))^2+((yn(j)-y(i))^2)); % Cálculo das distâncias do
        ponto de prova ao condutores
        rocl(i,j) = ((xn(j)-x(i))^2+((yn(j)+y(i))^2)); % Cálculo das distâncias do
        ponto de prova as imagens dos condutores
    end
end

% -----Cálculo dos Campos Eletricos nas direções X e Y para cada
condutor-----

for i = 1:nf
    for j = 1:fsaux
        Ex(i,j) = (Q(i)/(2*pi*eo))*(((xn(j)-x(i))/(roc(i,j))) - ((xn(j)-x(i))/(rocl(i,j))));
        Ey(i,j) = (Q(i)/(2*pi*eo))*(((yn(j)-y(i))/(roc(i,j))) - ((yn(j)+y(i))/(rocl(i,j))));
    end
end

Extot = sum(Ex); % Campo Elétrico total na direção x
Eytot = sum(Ey); % Campo Elétrico total na direção y

for j = 1:fsaux

```

```

Etotal(j)
((real(Extot(j)))^2+(imag(Extot(j)))^2+(real(Eytot(j)))^2+(imag(Eytot(j)))^
2)^(1/2);          %Campo total resultante
end

hold on
plot(xn,Etotal/1000,'-b') % Plotagem do perfil transversal do Campo Elétrico
ao longo da faixa de servidão
xlabel ('\bf{Distância X - Faixa de Servidão[m]}')
ylabel ('\bf{Campo Elétrico - E[KV/m]}')
title({'\bf\fontsize{14} Perfil Transversal do Campo Elétrico'; '\itMedido
à 1m do solo para a altura mínima do cabo condutor} '), 'FontWeight', 'Normal')
grid on

% -----Cálculo do Campo Magnético-----

for i = 1:nf
    for j = 1:fsaux
        rocmg(i,j) = ((xn(j)-x(i))^2+((yn(j))-y(i))^2)^(1/2);          % Cálculo das
distâncias do ponto de prova ao condutores
        roclmg(i,j)= ((xn(j)-x(i))^2+((yn(j))-yidr(i))^2)^(1/2);      % Cálculo das
distâncias do ponto de prova as imagens dos condutores
    end
end

% -----Cálculo dos Campos Magnéticos nas direções X e Y para cada
condutor-----
for i = 1:nf
    for j = 1:fsaux
        Hy(i,j)    =    (I(i)/(2*pi))*((y(i)-(yn(j)))/(rocmg(i,j))^2    -    (y(i)-
(yn(j)))/(roclmg(i,j))^2);
        Hx(i,j)    =    (I(i)/(2*pi))*((xn(j)-    x(i))/(rocmg(i,j))^2    -    (xn(j)-
x(i))/(roclmg(i,j))^2);
    end
end

Hxtot = sum(Hx); % Campo Magnético total na direção x
Hytot = sum(Hy); % Campo Magnético total na direção y

for j = 1:fsaux

```

```

Htotal(j)
=((real(Hxtot(j)))^2+(imag(Hxtot(j)))^2+(real(Hytot(j)))^2+(imag(Hytot(j)))
^2)^(1/2); % Campo total resultante

Btotal(j) = mo*Htotal(j); %
Cálculo da densidade de fluxo magnético

end

hold on

figure

plot(xn,Btotal*1000000,'-b') % Plotagem do perfil transversal da Densidade
de Fluxo Magnético ao longo da faixa de servidão

xlabel ('\bf{Distância X - Faixa de Servidão[m]}')

ylabel ('\bf{Campo Magnético - B[μT]}')

title({'\bf\fontsize{14} Perfil Transversal do Campo Magnético'};
'\itMedido à 1m do solo para a altura mínima do cabo condutor}
','FontWeight','Normal')

grid on

```