

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CINTIA ARANTES SILVA

**ANÁLISE DO ACOPLAMENTO ELÉTRICO ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO
OPERANDO EM REGIME PERMANENTE: ESTUDO DE CASO DE LINHAS DO
SISTEMA FURNAS**

FORMIGA - MG

2016

CINTIA ARANTES SILVA

**ANÁLISE DO ACOPLAMENTO ELÉTRICO ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO
OPERANDO EM REGIME PERMANENTE: ESTUDO DE CASO DE LINHAS DO
SISTEMA FURNAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do IFMG-Formiga, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Msc. Gustavo Lobato Campos.

FORMIGA - MG

2016

CINTIA ARANTES SILVA

**ANÁLISE DO ACOPLAMENTO ELÉTRICO ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO
OPERANDO EM REGIME PERMANENTE: ESTUDO DE CASO DE LINHAS DO
SISTEMA FURNAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Federal Campus
Formiga, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ____ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Gustavo Lobato Campos - Orientador

Prof.^a Msc. Mariana Guimarães dos Santos - Avaliadora

Prof.^a Msc. Ana Paula Lima dos Santos - Avaliadora

Dedico este trabalho aos meus pais,
Sérgio e Esmerái, ao meu namorado,
Marco Antônio, e a todos os amigos
e familiares que me apoiaram
incondicionalmente.

RESUMO

Este trabalho consiste em medir, calcular, analisar e avaliar os níveis de campos elétricos incidentes no solo, gerados por um sistema composto por duas linhas de transmissão operando em regime permanente, de 345 kV, pertencentes à empresa Eletrobras Furnas. O processo experimental de medição em campo foi realizado em um trecho localizado no município de São José da Barra – Minas Gerais. De posse das configurações geométricas das linhas de transmissão foi possível realizar de forma teórica, os cálculos dos campos gerados pelas mesmas, através de um programa computacional desenvolvido no *software* Matlab®. A metodologia utilizada na rotina computacional tem por base as equações de Maxwell associadas ao teorema da superposição e a um método numérico de simplificação de soluções analíticas. Destaque ainda para a validação desta rotina computacional realizada por meio de comparações com referências existentes na literatura. Desta forma será realizada uma análise comparativa entre os dados de medição de campo, com os obtidos via simulação computacional, com foco no perfil de comportamento do campo elétrico, além de análise e avaliação dos níveis de campos elétricos gerados pelo sistema. Destaca-se a importância deste trabalho, uma vez que estão diretamente associados a aspectos de segurança pessoal.

Palavras-chave: Campo elétrico. Linhas de transmissão. Equações de Maxwell. Teorema da superposição.

ABSTRACT

The goal of this project is measuring, calculating, analyzing and evaluating the electric field levels that hit the ground and are generated by a system composed of two transmission lines operating at steady state, 345 kV, belonging to Eletrobras Furnas. The experimental measuring procedure was performed on a section located in São José da Barra - Minas Gerais state. It was possible to perform the calculations of the electric fields generated by the transmission lines, having in hands their geometric settings, through a computer program developed on Matlab® software. The methodology applied on the computational routine was based on Maxwell's equations associated with the superposition theorem and a numerical method of simplification of analytical solutions. Also noteworthy was the validation of this computational routine performed by comparisons with existing literature references. In this way, there will be a comparative analysis between the field measurement data with those obtained from the computer simulation, focusing on the electric field behavior profile, as well as the analysis and evaluation of electric field levels generated by the system. The importance of this project should be highlighted, since it is directly related to personal security aspects.

Keywords: Electric field. Transmission lines. Maxwell equations. Theorem of superposition.

LISTA DE SIGLAS

LT's – Linhas de Transmissão

SEP – Sistema Elétrico de Potência

OMS – Organização Mundial da Saúde

ICNIRP – *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

CEM's – Campos Eletromagnéticos

LLA – Leucemia Linfocítica Aguda

NAS – *National Academy of Sciences*

NRPB – *National Radiation Protection Board*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

LACTEC – Instituto Tecnologia para o Desenvolvimento

COELCE – Companhia Energética do Ceará

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CA – Corrente Alternada

LTFUES – Linha de Transmissão – Usina de Furnas à Subestação de Estreito

LTFUMM – Linha de Transmissão – Usina de Furnas à Subestação de Mascarenhas de Morais.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

MI – Método das Imagens

MII – Método das Imagens Ideais

MSC – Método de Simulação de Carga

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema brasileiro de transmissão.	27
Figura 2: Estruturas de torres de LT's do tipo delta, pirâmide e estaiada em V (da esquerda para direita).	30
Figura 3: Tipos de suportes aplicados nas linhas de transmissão.	31
Figura 4: Modelagem do campo elétrico no nível do solo, produzido por uma LT em regime permanente.	32
Figura 5: Cálculo da largura da faixa de servidão de uma linha de transmissão.	34
Figura 6: Silhueta das torres 3 e 4 do sistema LTFUES / LTFUMM.	35
Figura 7: Linhas LTFUES e LTFUMM, respectivamente.	36
Figura 8: Medidor de temperatura e umidade relativa do ar - MT-242. Fab. Minipa.	36
Figura 9: Medidor de altura dos cabos condutores - Saparulle.	37
Figura 10: Medidor de campo elétrico - EFA 300. Fab. Narda.	37
Figura 11: Esquemático do cenário da medição de campo elétrico.	38
Figura 12: Superfície Gaussiana em torno de uma linha infinita de carga.	43
Figura 13: Método das imagens aplicado a um sistema genérico.	44
Figura 14: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada no sistema A.	49
Figura 15: Perfil do campo elétrico obtido pela literatura ao nível do solo, considerando $Y_{eq} = 12,5m$	50
Figura 16: Perfil do campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido, para o sistema A considerando $Y_{eq} = 12,5m$	50
Figura 17: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada no sistema B.	51
Figura 18: Perfil do campo elétrico obtido pela literatura ao nível do solo.	51
Figura 19: Perfil do campo elétrico obtido pelo programa computacional desenvolvido, para o sistema B.	52
Figura 20: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada no sistema C.	53
Figura 21: Perfil do campo elétrico obtido pela literatura por meio de simulações computacionais.	53
Figura 22: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido, para o sistema C.	54

Figura 23: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada no sistema D.....	54
Figura 24: Perfil do campo elétrico obtido por simulações realizadas pela literatura.....	55
Figura 25: Perfil do campo elétrico obtido pela simulação no <i>software</i> desenvolvido, para o sistema D.....	56
Figura 26: Torre 3 do sistema LTFUES e LTFUMM, respectivamente.	57
Figura 27: Sistema sob estudo composto pela LTFUES e LTFUMM, respectivamente.....	57
Figura 28: Trecho onde foi realizada a medição - Entrada da Oficina da Eletrobrás Furnas.....	58
Figura 29: Realizando o processo de medição do campo elétrico.....	58
Figura 30: Realizando o processo de medição juntamente com a funcionária de Furnas.....	59
Figura 31: Medidor de campo elétrico EFA 300 e o suporte auxiliar de medição.	59
Figura 32: Perfil do campo elétrico encontrado na medição realizada.....	60
Figura 33: Perfil do campo obtido via simulação computacional.....	61
Figura 34: Comparação entre os níveis de campos elétricos referentes à medição e a simulação computacional.....	61
Figura 35: O erro absoluto devido às duas curvas.	62
Figura 36: Erro quadrático obtido via comparação.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis de referências para campos elétricos e magnéticos, em 60 Hz.	26
Tabela 2: Registros das características de medição.	39
Tabela 3: Características físicas do sistema Furnas - Estreito (LTFUES).	39
Tabela 4: Características físicas do sistema Furnas - Mascarenhas de Moraes.	40

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problema	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Hipótese	14
1.4	Estrutura do trabalho	15
2.	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Revisão do estado da arte.....	18
3.2	Linhas de transmissão.....	26
3.3	Procedimento de medição do campo elétrico.....	35
3.3.1	Caracterização do ambiente de medição	35
3.4	Cálculo do campo elétrico	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Validação da rotina computacional.....	48
4.2	Campo elétrico do sistema sob estudo: medidos e calculados	56
5.	CONCLUSÃO	64
6.	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A – Fluxograma da rotina computacional	70

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população e o gradativo acesso dessa à equipamentos eletroeletrônicos, principalmente a partir do começo do século XX, são responsáveis pelo crescimento da demanda por energia elétrica. Para que a energia elétrica chegue aos consumidores brasileiros, utiliza-se um sistema elétrico composto, basicamente, por geração, transmissão e distribuição.

A geração consiste no setor responsável pela transformação de qualquer tipo de energia em energia elétrica. Esta energia produzida é entregue aos centros consumidores através do setor de transmissão e, a entrega ao consumidor final, isto é, para as áreas residenciais, comerciais, industriais e rurais é feita pelo setor de distribuição.

Atualmente a maneira mais eficiente de levar energia do ponto de geração aos centros consumidores é por meio de linhas de transmissão (LT's), sendo essas componentes fundamentais do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Com o intuito de reduzir perdas na transmissão, eleva-se o nível de tensão das LT's e, em consequência disso, são gerados campos elétricos também elevados, visto que estes estão diretamente relacionados aos níveis de tensões das linhas.

No Brasil, em decorrência de problemas geográficos, econômicos ou sociais, algumas linhas de transmissão estão situadas em regiões próximas de áreas residenciais. Fato que causa preocupação na comunidade local quanto aos danos à saúde que podem surgir devido à exposição aos elevados níveis de campos elétricos e magnéticos presentes nas LT's. Para controlar os efeitos desta exposição, torna-se necessária a delimitação, em ambos os lados da linha de transmissão, de uma distância de segurança, denominada de faixa de servidão, que não deve ser habitada.

A interferência eletromagnética de uma linha de transmissão pode ser analisada, de modo geral, considerando que a LT está operando em regime permanente ou em regime transitório, descritos brevemente a seguir:

- Regime permanente: regime nominal de operação dos grandes centros de geração de energia, frequência de 50 a 60 Hz.
- Regime transitório: o espectro de frequência característica é amplo, podendo chegar até 10 MHz. Proveniente de grandes manobras na

linha de transmissão, como operações de chaveamento, ou mesmo curtos-circuitos ou descargas atmosféricas.

Os limites máximos de campos elétricos, gerados por linhas de transmissão em operação a 60 Hz, adotados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para a exposição ao Público em Geral, com bases nas recomendações da *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP, 2001), são de 4,17 kV/m. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2014), estipula que o valor máximo do campo elétrico, para instalações em 60 Hz, seja de:

- Público em Geral: 4,17 kV/m;
- Público Ocupacional: 8,33 kV/m.

Diante da regulamentação é necessário verificar, através de experimentos de medições de campo elétrico, se um sistema composto por linhas de transmissão está operando dentro dos limites especificados. É possível, ainda, desenvolver uma modelagem computacional capaz de calcular teoricamente estes níveis de campo (ao nível do solo) gerados pelo mesmo sistema.

1.1 Problema

Atualmente, apesar da grande malha de transmissão existente no Brasil, em torno de 146.469 Km, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), com o crescimento da demanda energética surge a necessidade de novas instalações de linhas de transmissão. Estas novas instalações, estão se localizando cada vez mais próximas aos centros urbanos, tornando-se comum a presença de novas estruturas dentro da faixa de passagem destas LT's.

São devido a estas novas instalações, que podem ser casas, escolas, indústrias, etc., que tem se motivado os estudos sobre a avaliação da exposição eletromagnética entre as linhas de transmissão e as estruturas afetadas. Já que os estudos presentes na literatura avaliam a possibilidade de uma associação causal entre campos eletromagnéticos gerados por sistemas em operação 60 Hz e possíveis danos a seres humanos, animais ou objetos nas proximidades de linhas de transmissão.

Destaca-se também a falta de estudos criteriosos para as fases iniciais de um projeto de implementação de estruturas em alta tensão, já que o mesmo seria de grande valia, pois poderia ser previsto e avaliado a melhor localização das LT's e os níveis de campos elétricos e magnéticos que as mesmas iriam gerar sobre a população ao redor, antes mesmo da sua instalação.

1.2 Justificativa

O ponto mais crítico quanto à exposição de elevados níveis de campos elétricos em baixas frequências são as possíveis patologias que o público alvo pode vir a desenvolver ao longo prazo. Entende-se como longo prazo, um período de exposição por anos seguidos. Em 1979, por exemplo, em Denver (EUA), foi realizado um estudo epidemiológico sobre tumores na infância, onde indicou uma relação entre a incidência de câncer em crianças e a proximidade de suas casas com linhas de transmissão de energia. Em 1996, no Brasil, foi feito um estudo pelo Departamento de Epidemiologia da Fundação Oswaldo Cruz, sobre a mortalidade por câncer em trabalhadores de uma companhia geradora de eletricidade do estado de São Paulo (WERTHEIMER, LEEPER, 1979) (MATTOS, KOIFMAN, 1993).

Sendo assim é de extrema importância verificar se os níveis de interferência eletromagnética produzidos por estas LT's estão dentro dos limites impostos pelas legislações em vigência. Os valores de referência para campos elétricos, ao qual um ser humano pode eventualmente se submeter, conforme já mencionado neste texto, são estabelecidos pela Comissão Internacional para Proteção contra Radiações Não-Ionizantes (ICNIRP) e são reconhecidos pela OMS com máximos valores de 4,17 kV/m para Público em Geral e 8,33 kV/m para Público Ocupacional.

1.3 Hipótese

Assim este trabalho apresenta um estudo de caso dos níveis de campos elétricos incidentes no solo, gerados por um sistema composto por duas linhas de

transmissão operando em regime permanente, de 345 kV, pertencentes à empresa Eletrobras Furnas, em um trecho de exclusivo acesso à funcionários. A proposta é medir, calcular, analisar e avaliar se os campos elétricos gerados por este sistema estão dentro dos níveis recomendados pela legislação da área.

Para a realização deste propósito, foi utilizado além das medições em campo, um programa computacional desenvolvido no *software* Matlab®, que tem por base as equações de Maxwell associadas ao teorema da superposição e a um método numérico de simplificação de soluções analíticas. A validação desta rotina computacional é realizada por meio de comparações com referências existentes na literatura. Desta forma é realizada uma análise comparativa entre os dados adquiridos por estes métodos, que será detalhado no tópico 4.2 do trabalho.

1.4 Estrutura do trabalho

A estruturação do trabalho é constituída por cinco capítulos, divididos da seguinte forma:

- Capítulo 1: Corresponde à apresentação do tema, contextualizando-o de um modo geral, bem como expondo os problemas, a justificativa e a hipótese do mesmo.
- Capítulo 2: São detalhados os objetivos do trabalho.
- Capítulo 3: São apresentadas revisões do estado da arte e do funcionamento de uma linha de transmissão, ambas embasadas na literatura. Além de retratar a metodologia utilizada para realizar medições e cálculos do campo elétrico.
- Capítulo 4: Mostra tanto os resultados obtidos no processo de validação do *software* desenvolvido quanto os resultados alcançados ao aplicar a metodologia proposta no sistema real sob estudo.
- Capítulo 5: Apresenta as conclusões obtidas e uma proposta para continuação deste trabalho.

2. OBJETIVOS

Neste capítulo serão apresentados e detalhados os objetivos do trabalho que conduzirão a metodologia da pesquisa para alcançar os resultados pretendidos.

2.1 Objetivo geral

Este trabalho propõe o cálculo dos níveis de campos elétricos gerados no nível do solo por um sistema de duas linhas de transmissão que operam em regime permanente, por meio de uma rotina computacional implementada em ambiente Matlab®. Propõem-se ainda comparações com dados de campos elétricos coletados através de uma medição em campo de um sistema em alta tensão. A validação da rotina desenvolvida é realizada por meio de comparações com outras referências publicadas na literatura.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar sobre o princípio de funcionamento de linhas de transmissão;
- Desenvolver uma rotina computacional capaz de calcular o campo elétrico gerado por uma linha de transmissão;
- Realizar a validação deste *software* implementado com referências publicadas na literatura;
- Realizar uma medição em campo dos níveis de campos elétricos de um sistema real de linhas de transmissão;
- Realizar uma simulação com o uso da ferramenta computacional, para calcular os níveis de campos elétricos gerados pelo sistema sob estudo;

- Comparar os dados obtidos pela simulação computacional com os dados adquiridos através da medição em campo;
- E avaliar se os dados encontrados estão de acordo com os estabelecidos pelos órgãos regulamentadores.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta um embasamento da literatura sobre o tema abordado neste trabalho.

3.1 Revisão do estado da arte

Diversos órgãos e instituições em diferentes países estudaram e analisaram as pesquisas a respeito de efeitos de longo prazo de campos eletromagnéticos de baixa frequência. Estas revisões procuraram verificar a possibilidade de uma associação entre a exposição dos campos eletromagnéticos (CEM's) de baixa frequência com a ocorrência de patologias. Entre os diversos estudos, estão:

- O primeiro estudo a mencionar tal associação, foi feito por Wertheimer e Leeper em 1979, em Denver - EUA, onde foi realizado um estudo epidemiológico sobre tumores na infância. O resultado indicou uma relação entre a incidência de câncer em crianças e a proximidade de suas casas com linhas de transmissão de energia duas vezes superior ao restante da população. Este estudo teve grande repercussão na imprensa (WERTHEIMER, LEEPER, 1979).
- Entre 1993-1998, o projeto internacional *EMF-Rapid* foi desenvolvido por um grupo de especialistas dos Estados Unidos a pedido do próprio governo. O estudo consumiu cerca de 30 milhões de dólares em recursos e concluiu que não há evidências científicas de que campos magnéticos 60 Hz causam diretamente câncer em animais (RAMÍREZ, 2001).
- Em 1996, a OMS criou o Projeto Internacional de Campos Eletromagnéticos a fim de investigar os potenciais riscos para a saúde associados às tecnologias emissoras de campos elétricos e magnéticos, consumindo cerca de 1 milhão de dólares em recursos. Em 2007, seguindo um procedimento padronizado de avaliação de risco, um grupo de trabalho concluiu que não há um problema de

saúde substancial relacionado aos campos elétricos de frequência extremamente baixa, encontrados pelos indivíduos da população em geral. E concluiu também que a evidência científica que sustenta a associação entre a exposição dos campos magnéticos de baixa frequência e os efeitos sobre a saúde, é muito mais fraca para a leucemia infantil. Para a incidência de outras doenças (doenças cardiovasculares ou câncer mama) a evidência sugere que estas doenças não são causadas por estes campos (WHO, 2007).

- Tynes e Haldorsen, em 1997 realizaram um estudo caso-controle com 523 casos de câncer e 2112 controles entre crianças de 0 a 14 anos. A exposição foi determinada, principalmente, com base às estimativas dos campos magnéticos derivados da média anual da carga histórica do sistema elétrico da Noruega. Não foram observadas associações estatisticamente significativas para leucemias, tumores de cérebro e linfomas, ao se utilizar essas estimativas, assim como ao se considerar a distância entre as linhas de eletricidade e a residência da criança (TYNES, HALDORSEN, 1997).
- Linet e colaboradores, em 1997, nos Estados Unidos estudaram a associação entre exposição residencial aos CEM's e leucemia linfocítica aguda (LLA) em crianças menores de 15 anos. A população de estudo foi constituída de 767 casos, residentes em nove estados americanos e diagnosticados no período 1989-1994; e por 725 controles selecionados aleatoriamente. A exposição foi determinada através das medições dos campos magnéticos, em todas as residências, especificadamente nos quartos das crianças, onde elas haviam residido no mínimo por seis meses, sendo calculada uma média ponderada dos valores observados. Esse estudo foi criticado devido ao método utilizado para determinar a exposição. A média ponderada das medições realizadas nos diferentes domicílios ocupados pelas crianças poderia ter diluído o efeito se, por exemplo, as altas exposições por períodos curtos de tempo e as exposições de menor intensidade por longos períodos compoisse uma média única (LINET et al, 1997).

- McBride e colaboradores, em 1999 analisaram casos de leucemia ocorridos entre 1990-1994, residentes num raio de 100 km das principais cidades de uma série de províncias Canadenses. Os controles foram selecionados aleatoriamente a partir do cadastro de seguridade social de cada província. A exposição foi determinada através de medição individual, feita por 48 horas, dos campos elétricos e magnéticos através de um dosímetro, além de uma medição de 24 horas nos quartos das crianças. Não foram observadas estimativas elevadas de risco, com base em diferentes percentuais de exposição (MCBRIDE et al., 1999).
- No Brasil, em 1996 foi publicado um estudo pelo Departamento de Epidemiologia da Fundação Oswaldo Cruz, sobre a mortalidade por câncer em trabalhadores de uma companhia geradora de eletricidade do estado de São Paulo. Foram feitas análises exploratórias de um conjunto de atestados de óbito de eletricitários e foi observado um excesso de óbitos, para câncer nas cavidades oral/faringe, próstata, bexiga, cérebro e doença de Hodgkin, porém sem dados estaticamente significativos. Os resultados do presente estudo mostraram-se relativamente similares aos descritos na literatura, e representam mais um conjunto de resultados que reforçam a possibilidade de uma associação causal entre exposição aos CEM's de frequência industrial e o desenvolvimento de alguns tipos específicos de câncer (MATTOS, KOIFMAN, 1996).
- Entre 1997 e 2003 foi realizado também no Brasil, um estudo epidemiológico de incidências de leucemias na infância associado com a exposição dos campos eletromagnéticos originados por uma linha de transmissão (60 Hz), localizado no município de São Paulo. Comparando-se a distribuição espacial de óbitos e os casos de leucemias em menores de 15 anos em relação à exposição aos campos eletromagnéticos originados das LT's em alta tensão presentes na área, não foi constatada nenhuma associação entre ambas às distribuições espaciais com os níveis eletromagnéticos (KOIFMAN, LAND, MORENO, KOIFMAN, MATTOS, 2003).

- Em 2004, em Londres, foi desenvolvido um trabalho que informou a ocorrência de enfermidades em trabalhadores Soviéticos de uma subestação de alta tensão (400 a 750 kV). Os tipos de sintomas relatados sugeriram a hipótese de que a exposição aos campos intensos provocaria efeitos adversos ao sistema nervoso. Entretanto, os estudos realizados não tiveram grupos de controle adequados e não consideraram a possibilidade dos efeitos adversos serem decorrentes de fatores, como ambiente e o estilo de vida, por exemplo, que são aspectos fundamentais em um estudo epidemiológico (HAVAS, 2004).

Contudo, diante dos estudos mencionados e dos outros estudos presentes na literatura (SAVITZ, WATCHEL, BARNES, 1988), (POLK, 1991), (MORENO 2005), (PERRO, 2007) verifica-se que maior parte dos estudos epidemiológicos não encontrou evidências de associação dos campos eletromagnéticos (de 50 – 60 Hz) com câncer ou outros efeitos adversos à saúde. Admite-se, então, que os níveis de exposição atualmente propostos em recomendações internacionais estão aceitáveis.

Sendo assim órgãos, comitês e instituições deram seus pareceres quanto aos estudos realizados sobre a possibilidade dos campos eletromagnéticos serem danosos à saúde. O Comitê Sobre Possíveis Efeitos dos Campos Eletromagnéticos em Seres Vivos, instituído pela *National Academy Of Sciences* (NAS) dos EUA declarou: *“Baseado numa avaliação exaustiva dos estudos publicados com relação aos efeitos de campos elétricos e magnéticos de frequência industrial (50 e 60 Hz) sobre células, tecidos e organismos (incluindo os seres humanos), a conclusão do Comitê é que as evidências não mostram que estes campos apresentam perigo à saúde humana. Especificamente, nenhuma evidência conclusiva e consistente mostra que a exposição aos campos elétricos e magnéticos em residências produz câncer, efeitos neurocomportamentais adversos, ou efeitos sobre a reprodução ou desenvolvimento”* (NAS, 1997).

Em 2001, o grupo de radiações não ionizantes do *National Radiation Protection Board* (NRPB) do Reino Unido, emitiu também um parecer semelhante: *“Experimentos de laboratório não tem fornecido uma boa evidência que campos eletromagnéticos de frequência extremamente baixa são capazes de produzir câncer e nem estudos epidemiológicos em seres humanos sugerem que estes campos possam causar câncer em geral. Existe, entretanto, alguma evidência epidemiológica que a prolongada exposição a altos níveis de campos magnéticos de*

frequência industrial está associada a um pequeno risco de leucemia infantil. Na prática, tais níveis de exposição são raramente encontrados pela população em geral no Reino Unido. Na ausência de uma clara evidência de efeitos carcinogênicos em adultos ou de uma explicação plausível a partir de experimentos em animais ou células isoladas, a evidência epidemiológica não é forte o suficiente para justificar uma conclusão de que tais campos causem leucemia em crianças” (NRPB, 2001).

O ICNIRP ligado à OMS, em 1998 emitiu também a sua declaração: *“É visão do ICNIRP que os resultados da pesquisa epidemiológica sobre a associação entre exposição dos CEM’s e câncer, incluindo leucemia infantil, não são robustos o suficiente para, na ausência de pesquisas experimentais, formar base científica para o estabelecimento de normas” (ICNIRP, 1998).*

O Comitê de Epidemiologia do *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)*, em 2001 realizou uma nova revisão da literatura epidemiológica a respeito de campos eletromagnéticos de baixa frequência e a saúde humana. Com base nesta avaliação concluiu: *“Na ausência de evidências experimentais e considerando as incertezas metodológicas na literatura epidemiológica, não existe doença crônica para a qual uma relação etiológica com campos eletromagnéticos de baixa frequência possa ser considerada estabelecida” (IEEE, 2002).*

O Conselho Nacional de Proteção Radiológica (NRPB) (Divisão de Proteção contra Radiação da Agência de Proteção à Saúde) é o órgão britânico de proteção contra radiações ionizantes e não ionizantes. O NRPB publicou uma revisão da evidência científica para a limitação da exposição a campos eletromagnéticos (0 a 300 GHz). As conclusões principais desta revisão foram as seguintes: *“Na opinião do NRPB, a evidência epidemiológica de que a exposição média a campos magnéticos de frequência industrial acima de 0.4 μ T está associada a um pequeno aumento do risco de leucemia em crianças é, no momento, uma observação para a qual não existe explicação científica razoável. Não há evidência clara de efeito carcinogênico de campos eletromagnéticos de baixa frequência em adultos, nem explicação biológica plausível da associação que pode ser obtida a partir de experimentos com animais ou com estudos celulares ou moleculares.*

Estudos a respeito de suicídio e de depressão têm apresentado resultados inconsistentes em relação à exposição a campos eletromagnéticos de frequência extremamente baixa, e a evidência de uma conexão com doenças cardiovasculares é fraca.

A evidência global de estudos da exposição materna a campos eletromagnéticos de frequências extremamente baixas no ambiente de trabalho não indica uma associação com efeitos nocivos à gravidez. Os resultados de estudos de fertilidade masculina, de efeitos reprodutivos e de câncer infantil em relação à exposição ocupacional dos pais aos campos eletromagnéticos de baixa frequência têm sido inconsistentes e não convincentes” (NRPB, 2004).

Sendo assim, é visto que as últimas avaliações de organizações científicas e pesquisadores do assunto sugerem uma ausência de um problema maior de saúde pública em se tratando da exposição eletromagnética de baixa frequência, porém é de extrema importância que estes níveis eletromagnéticos estejam dentro dos níveis regulamentados pelas normas existentes.

Estudos de determinações e avaliações dos níveis de campos eletromagnéticos de uma LT, abordando o método prático de medições em campo, estão em crescente avanço. No Brasil, entre alguns estudos destacam-se:

- Em 2005, no XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), realizado no Paraná, foi apresentado um artigo sobre medições de campos eletromagnéticos de baixa frequência em linhas de transmissão e subestações. Os responsáveis pelo trabalho são do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Unidade de Tecnologia em Compatibilidade Eletromagnética (LACTEC) e realizaram o estudo durante o primeiro semestre de 2004, através de medições dos campos eletromagnéticos, na baixa frequência de 5 Hz a 2 kHz, em subestações e nas adjacências de LT's de uma concessionária de energia elétrica. Na primeira etapa do trabalho foram mapeadas vinte e duas subestações, com tensões variando entre 13,8 kV e 525 kV. A segunda etapa constituiu das medições dos campos elétricos e magnéticos próximo a nove linhas de transmissão, com tensões entre 69 kV e 525 kV, efetuadas seguindo o procedimento recomendado pela norma 644 do IEEE. As duas etapas resultaram em cerca de 28000 pontos de medição. Os resultados referentes aos valores dos campos elétricos e magnéticos próximo às linhas de transmissão mostraram conformidade com os níveis máximos de exposição ocupacional, recomendados pelas diretrizes do ICNIRP. Já

os valores dos campos medidos em cerca de 30% das subestações excedem os limites das diretrizes (ARDJOMAND, 2005).

- Em 2005, no mesmo seminário mencionado (XVIII SNPTEE), outro trabalho foi publicado abordando a caracterização do ambiente eletromagnético em uma linha de transmissão de 500 kV de uma concessionária, apresentando seus cálculos e medições. Foram realizadas medições em um vão de uma LT de 500 kV com a presença de obstáculos (cercas, árvores, linhas de distribuição, vegetação e mata fechada), com a finalidade de determinar as dificuldades na realização das medições e a influência dessas variáveis no cálculo dos campos. As medições dos campos elétricos e campos magnéticos foram feitas em 40 perfis com 71 pontos cada um, espaçados de 1 metro, totalizando 2840 pontos de medições para cada grandeza. Em uma sessão, onde a presença da vegetação era de pequeno porte, foram encontrados os maiores valores de campos, justificando assim a influência nos valores medidos (GUIMARÃES, 2005).
- Em 2011, um estudo realizado no Paraná, apresentou avaliações de campos eletromagnéticos em regiões densamente povoadas. Foram realizadas medições dos níveis eletromagnéticos gerados por cinco LT's, todas de 69 kV, localizadas em regiões de grande densidade populacional, pertencentes à Companhia Energética do Ceará (COELCE). As medições foram realizadas em conformidade com as recomendações estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na norma técnica NBR 15415 - "Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz". Todos os valores de campos elétricos e magnéticos medidos nas vizinhanças das LT's foram muito inferiores aos níveis recomendados pela norma do IEEE e pelas diretrizes do ICNIRP para a exposição do Público em Geral (KUSTER, 2011).

Outro ponto a ser destacado envolve o histórico brasileiro referente à regulamentação dos níveis de campos eletromagnéticos gerados por uma linha de transmissão:

- Em 30 de Novembro de 2006, a ABNT criou a norma NBR 15415, que estabelece os limites para exposição do Público em Geral de 83,33 μ T

para campo magnético e 4,17 kV/m para campo elétrico na frequência de 60 Hz. Além de estabelecer os procedimentos e padrões para uma medição (ABNT, 2006).

- Em 5 de maio de 2009, a Lei Federal 11.934 foi sancionada para limitar a exposição do Público em Geral de 83,33 μ T para campo magnético e 4,17 kV/m para campo elétrico. E a exposição do Público Ocupacional de 416,67 μ T para campo magnético e 8,33 kV/m para campo elétrico (DECRETO LEI Nº 11.934, 2009).
- Em 23 de março de 2010, foi criada a Resolução Normativa 398 da ANEEL que regulamenta a Lei Federal 11.934 e estabelece procedimentos para regular e fiscalizar o atendimento aos limites de exposição a campos elétricos e magnéticos. Tal resolução é de extrema importância para o país e para a comunidade técnica, pois finalmente abordava sobre os níveis de exposição a serem respeitados pelo setor elétrico nacional, permitindo o julgamento de situações pertinentes ao assunto com mais clareza, (ANEEL, RESOLUÇÃO 398, 2010). Como é normal toda vez que uma nova regulamentação entra em vigor diversas questões têm sido levantadas pelas concessionárias que fazem parte do sistema de distribuição de energia e que ainda não foram totalmente respondidas pela ANEEL. O primeiro impasse gerado pela portaria foi a data dada para a execução dos serviços, o dia 31/12/2010. Como tal prazo mostrou-se insuficiente para a realização de todas as medições em 10/03/2010 a ANEEL editou a portaria 398, para a nova Resolução 413 prorrogando o prazo das adequações para 31/12/2011 (ANEEL, RESOLUÇÃO 413, 2010).
- Em 01 de julho de 2014, o Diretor Geral da ANEEL, no uso de suas atribuições regimentais, de acordo com deliberação da Diretoria, tendo em vista o disposto na Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, com base no art. 4º do Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997, na Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009, e no que consta do Processo nº 48500.004636/2009-62 e considerando as contribuições recebidas na Audiência Pública nº 097/2013, realizada entre 2 de setembro e 1º de novembro de 2013, por intercâmbio documental, que foram objeto de análise desta Agência e permitiram o aperfeiçoamento deste ato

regulamentar, resolveu-se alterar a ementa da Resolução Normativa nº 398, de 23 de março de 2010, para a Resolução Normativa nº 616/2014 (ANEEL, RESOLUÇÃO 616, 2014).

- As restrições básicas para exposição humana a campos elétricos e magnéticos recomendadas pela OMS, da Resolução Normativa 616/2014 (Art. 3º), estão estabelecidas no *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields – 2010*, da ICNIRP. E os níveis de referência para exposição do Público em Geral e da população ocupacional a campos elétricos e magnéticos nas frequências de 60 Hz são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Níveis de referências para campos elétricos e magnéticos, em 60 Hz.

Níveis de Referência para CEM em frequência de 60 Hz	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (µT)
Público em Geral	4,17	200,00
Público Ocupacional	8,33	1000,00

Fonte: ANEEL, RESOLUÇÃO 616, 2014.

Os limites da ICNIRP são baseados em efeitos conhecidos e reconhecidos cientificamente e são atualmente os mais adequados no âmbito internacional. Como a legislação brasileira está seguindo a ICNIRP, os limites de exposição nacionais podem ser alterados, inclusive com valores mais conservadores caso a ICNIRP aponte neste sentido. Tal situação poderia levar o setor elétrico a respeitar limites muito mais restritos que os atuais.

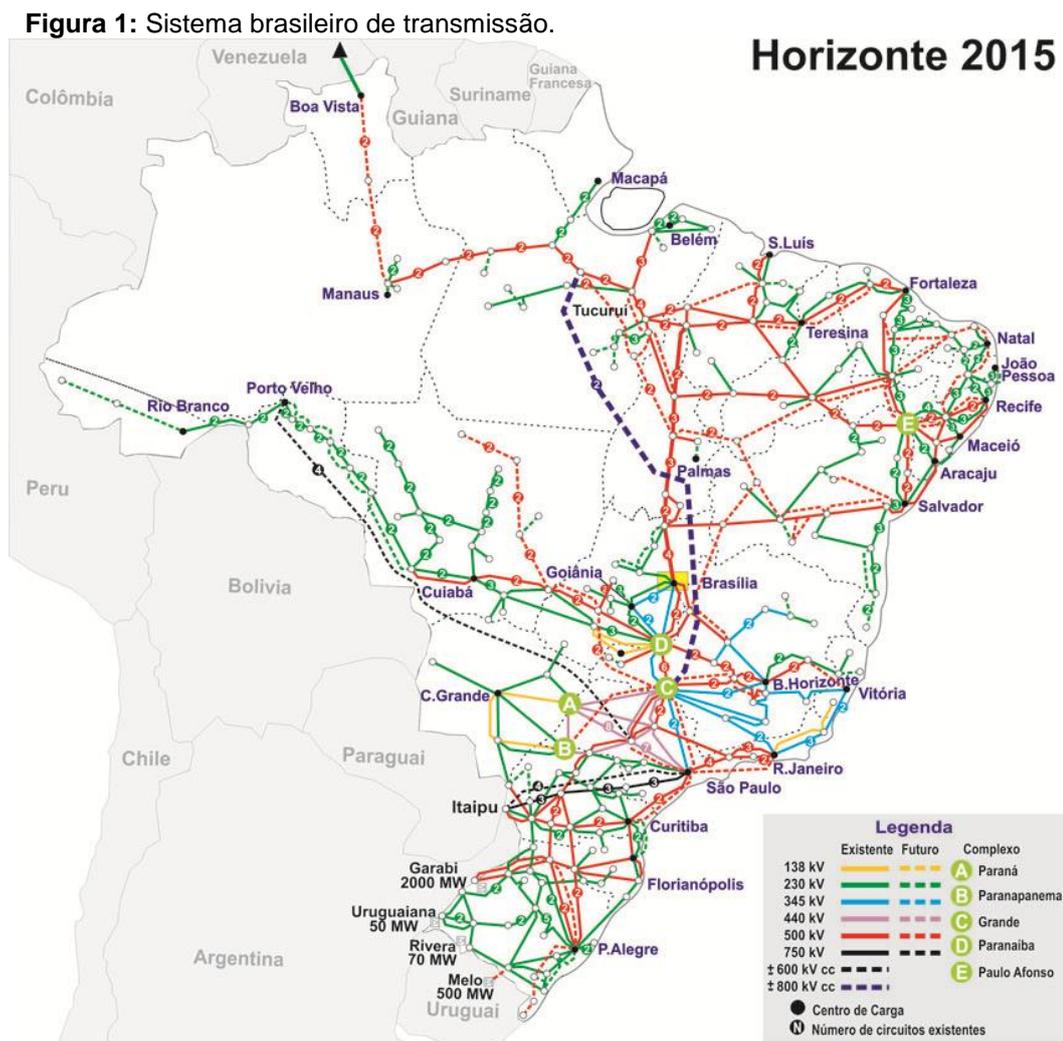
3.2 Linhas de transmissão

A linha de transmissão é o meio mais importante para entregar a energia produzida a seus consumidores. Definem-se linhas de transmissão como sistemas físicos que transportam um sinal elétrico entre um gerador e uma carga, através de um campo eletromagnético (HAYT, 1983). Existem alguns modelos de linhas de

transmissão, como linhas subterrâneas, linhas aéreas e linhas mistas. Este trabalho tem foco somente nas linhas de transmissão aéreas com corrente alternada (CA).

Para evitar grandes perdas na transmissão de energia, as LT's estão utilizando cada vez mais tensões elevadas e é justamente de acordo com o nível de tensão a que estão submetidas que as linhas são classificadas.

Há algumas variáveis que influenciam no nível de tensão a ser transportada por uma linha, como por exemplo: a potência a se transportar, o comprimento dessa linha e o custo para sua instalação. Destaca-se ainda que, existem normas que estabelecem os níveis de tensão a serem transmitidos. Atualmente no Brasil, os níveis para transmissão em corrente alternada são: 750 kV, 500 kV, 440 kV, 345 kV e 230 kV, e para subtransmissão tem-se 138 kV e 69 kV. Para transmissão em corrente contínua o nível estipulado é de 600 kV, como mostra a Figura 1 do ONS.



Fonte: ONS.

O desempenho elétrico de uma linha de transmissão depende quase exclusivamente de sua geometria, ou seja, de suas características físicas. O transporte de energia elétrica pelas linhas de transmissão tem a função perante o setor elétrico de ser eficiente, econômico e confiável. Para se transportar uma determinada quantidade de energia elétrica a uma distância preestabelecida, há um grande número de variáveis associadas à linha, como (LABEGALINI, LABEGALINI, FUCHS, ALMEIDA, 1992):

- Valor da tensão de transmissão;
- Número, tipo, bitolas e disposição dos cabos condutores;
- Número e tipo dos isoladores e distâncias de segurança;
- Número de circuitos trifásicos;
- Materiais estruturais e a forma dos suportes resistirem aos esforços, etc.

Todos os fatores intervenientes estão relacionados com os componentes físicos das linhas. Uma linha de transmissão se compõe das seguintes partes principais:

- Cabos condutores de energia e acessórios: São os elementos ativos das linhas de transmissão. Atuam com a função de “guias” da energia elétrica, já que como explica a teoria da transmissão, os reais agentes do transporte da energia elétrica são os campos elétricos e os magnéticos. A escolha adequada e o dimensionamento correto dos cabos condutores são de extrema importância para que as perdas de energia elétrica possam ser mantidas, economicamente, dentro dos limites toleráveis (por efeito Joule ou por Corona) e para se controlar os níveis de rádio interferência e ruídos acústicos. Os condutores ideais para linhas aéreas de transmissão são aqueles que apresentam as seguintes características:
 1. Alta condutibilidade elétrica;
 2. Baixo custo;
 3. Boa resistência mecânica;
 4. Baixo peso específico;
 5. Alta resistência à oxidação e à corrosão por agentes químicos poluentes.

Porém as condições acima mencionadas, como já bem definidas, infelizmente são de “condutores ideais”, pois não são atendidas simultaneamente por nenhum material em particular. Mas os que apresentam um compromisso entre essas propriedades são os cabos condutores de cobre e de alumínio (atualmente predominante no Brasil) (LABEGALINI, LABEGALINI, FUCHS, ALMEIDA, 1992).

- Estruturas isolantes: Os cabos são suportados pelas estruturas através dos isoladores, que como o próprio nome diz, os mantêm isolados eletricamente do seu suporte e do solo. Devem resistir tanto às solicitações mecânicas quanto às elétricas. As solicitações mecânicas às quais os isoladores são submetidos pelos cabos condutores são:
 1. Forças verticais – devido ao próprio peso;
 2. Forças horizontais axiais;
 3. Forças horizontais transversais.

As solicitações de natureza elétrica às quais um isolador deve resistir são as tensões mais elevadas que podem ocorrer em algum momento nas linhas, que são:

1. Sobre tensões de origem atmosférica, cujas intensidades podem ser muito elevadas e variadas;
2. Surtos de sobre tensão de manobra (ou chaveamento), que são de curta duração, podendo atingir de três a cinco vezes a tensão normal;
3. Tensão normal ou sobre tensões senoidais em frequência industrial.

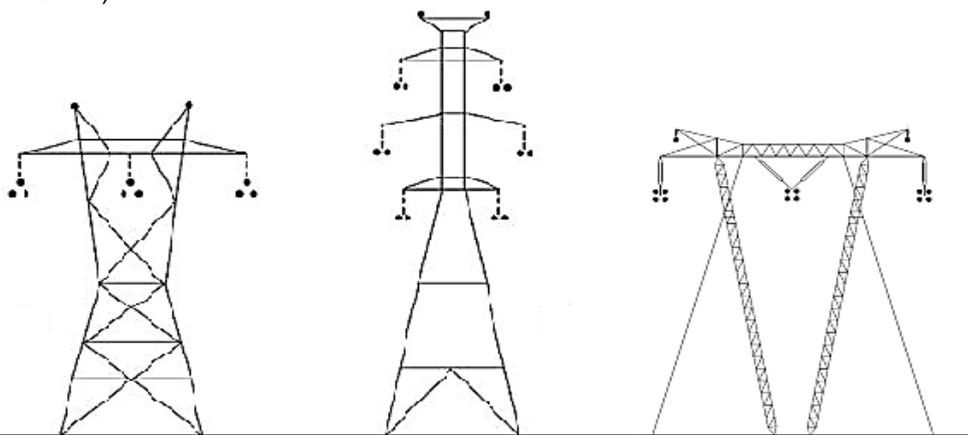
As superfícies dos isoladores devem ter um acabamento capaz de resistir bem às exposições ao tempo, assim para sua fabricação empregam-se os seguintes materiais: porcelana vitrificada, vidro temperado ou material sintético composto. Em linhas de transmissão são empregados basicamente três tipos:

1. Isoladores de pino;
 2. Isoladores tipo pilar;
 3. Isoladores de suspensão.
- Estruturas de suporte: Também chamadas de elementos de sustentação dos cabos das linhas de transmissão, apresentam uma grande variedade de estruturas em uso, e suas dimensões e formas dependem dos seguintes fatores (LABEGALINI, LABEGALINI, FUCHS, ALMEIDA, 1992):

1. Disposição e distância dos condutores – Disposição triangular, horizontal ou vertical;
2. Dimensões e formas de isolamento – São determinadas pela tensão nominal e pelas sobre tensões previstas;
3. Flechas dos condutores;
4. Altura de segurança;
5. Função mecânica – Determinadas pelos tipos de carga que devem suportar;
6. Forma de resistir das estruturas – Estruturas autoportantes (rígidas, flexíveis, mistas ou semirrígidas) ou estruturas estaiadas;
7. Materiais estruturais – Estruturas metálicas, madeiras ou estruturas de concreto;
8. Número de circuitos, etc.

A forma final dos suportes decorre da “arquitetura” mais adequada, com base em todos os requisitos citados, buscando sempre o melhor custo benefício. A Figura 2 mostra alguns exemplos.

Figura 2: Estruturas de torres de LT's do tipo delta, pirâmide e estaiada em V (da esquerda para direita).

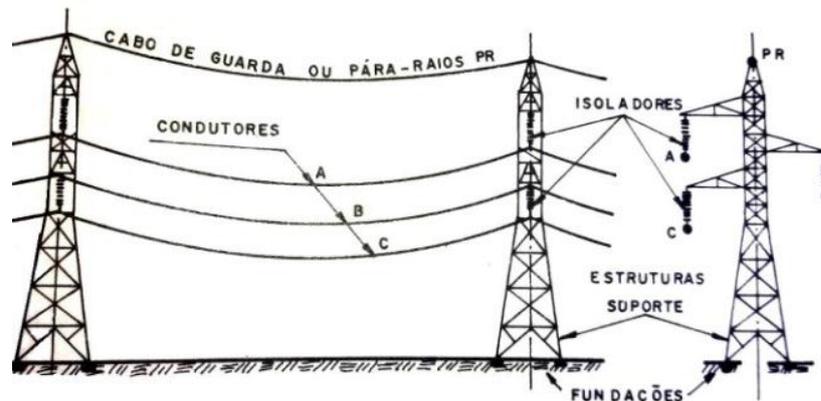


Fonte: LIMA, 2013.

- Cabos de guarda ou para-raios: Ocupam a parte superior das estruturas e têm a função de interceptar as descargas atmosféricas e evitar que atinjam os condutores, reduzindo assim a possibilidade de ocorrerem interrupções no sistema (LABEGALINI, LABEGALINI, FUCHS, ALMEIDA, 1992).

Sendo assim, os principais elementos de uma linha de transmissão citados acima, podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3: Tipos de suportes aplicados nas linhas de transmissão.



Fonte: LABEGALINI, LABEGALINI, FUCHS, ALMEIDA, 1992.

As linhas de transmissão CA tem sua operação modelada por resistência, indutância e capacitância uniformemente distribuídas ao longo da linha. A resistência consome energia, com perda de potência como mostra a Equação 1.

$$P = R \cdot I^2 \quad (1)$$

Em que:

- P = Potência dissipada, dada em watts.
- R = Resistência da linha, dada em ohms.
- I = Corrente, dada em ampère.

A indutância armazena energia no campo magnético devido à circulação de corrente. A capacitância armazena energia no campo elétrico, devido à diferença de potencial (FUCHS, 1977).

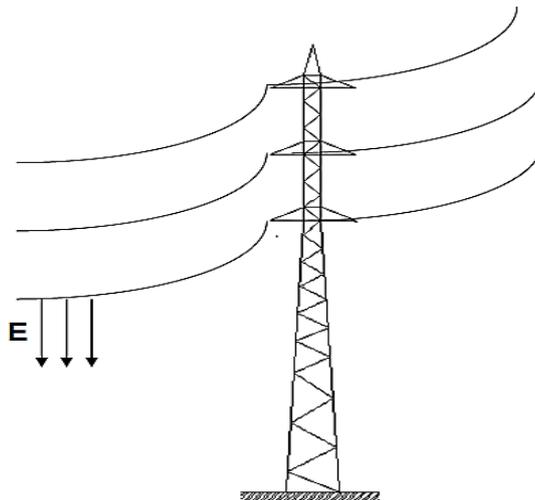
O funcionamento de uma linha de transmissão pode ser dividido em dois regimes de análise, conforme já mencionado anteriormente:

- Regime permanente: Operação com frequência de 50 a 60 Hz.
- Regime transitório: Operação com frequência em até 10 MHz.

De um modo geral, a avaliação da interferência eletromagnética das linhas de transmissão se dá em função do regime de operação da linha (permanente ou transitório) e dispositivo a ser influenciado. Normalmente, pode-se abordar este complexo problema eletromagnético em duas partes:

- Linha de Transmissão em regime permanente: A interferência é decomposta nos acoplamentos elétricos (capacitivo e condutivo) e magnéticos (indutivo).
 - Acoplamento condutivo: Ligado ao efeito resistivo possui uma modelagem longitudinal – se projeta ao longo da linha.
 - Acoplamento capacitivo: Modelagem divergente – se projeta ao longo do solo, como um efeito transversal à linha, como mostra a Figura 4.
 - Acoplamento indutivo: Modelagem rotacional – se projeta ao longo da linha.

Figura 4: Modelagem do campo elétrico no nível do solo, produzido por uma LT em regime permanente.



Fonte: LOPES, 2012.

- Linha de transmissão em regime transitório: Nesse caso, a interferência eletromagnética deve ser avaliada em função do acoplamento eletromagnético (irradiado), principalmente na faixa superior do espectro. Assim, os efeitos do campo elétrico e campo magnético não podem ser analisados de forma independentes, tornando o problema extremamente complexo (VIEIRA, 2013).

O caráter vetorial dos campos elétricos e magnéticos deve ser levado em consideração quando forem determinados através de medições ou cálculos. Pois são vetores, que possuem magnitude, direção e sentido. O princípio mais fundamental do eletromagnetismo afirma que cada carga individual cria um campo

elétrico, de forma tal que as linhas de campo saem das cargas positivas e chegam às negativas, sendo este campo capaz de gerar forças sobre as cargas elétricas sob sua influência. Pode-se ainda afirmar que o campo elétrico local (em um determinado ponto) é dado pela soma vetorial dos campos elétricos gerados por todas as cargas existentes, e o mesmo decresce com o quadrado da distância da fonte. Assim, como exemplo, o maior nível de campo elétrico em uma LT é observado diretamente abaixo da linha e decai rapidamente com a distância em relação aos condutores (KUSTER, 2011).

De forma similar, o campo elétrico produzido por uma linha de transmissão é função dos seguintes parâmetros:

- Tensão da linha: Quanto maior a tensão, maior o campo elétrico. E o mesmo é constante ao longo do tempo, já que é função da tensão da linha, e a mesma varia muito pouco.
- Altura dos condutores: Condutores mais baixos resultam em um nível maior de campo elétrico.
- Configuração e número de condutores: Influenciam a taxa de decaimento do campo elétrico em função da distância em relação à linha.
- Presença de objetos próximos: Objetos próximos ao ponto de medição, como árvores e estruturas metálicas, interferem na medição do campo elétrico.

Os campos eletromagnéticos podem ser determinados de forma analítica, por meio das equações de Maxwell (Lei de Gauss, Lei de Faraday, Lei de Ampère e a Lei de Gauss para o Magnetismo) ou por meio de medições. Como já foi citada, a proposta deste trabalho é o estudo do campo elétrico de uma linha de transmissão que opera em regime permanente, assim o campo elétrico e o campo magnético podem ser considerados independentes e desacoplados. Pois como vimos, os campos próximos de LT's possuem uma variação lenta no tempo, permitindo simplificações que desacoplam as equações de Maxwell, possibilitando o cálculo a partir das equações da quase estática (GUIMARÃES, 2005).

Antes mesmo de avaliar os níveis de campos elétricos, as linhas de transmissão devem estar de acordo com a norma brasileira NBR 5422 – “Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica” – que especifica as condições básicas de um projeto de linhas aéreas de transmissão, de modo a garantir níveis

mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações próximas (ABNT, 1995). O estabelecimento destes limites de segurança para exposição aos campos eletromagnéticos, em ambos os lados das linhas e ao longo de sua trajetória, é denominado “faixa de servidão” ou “faixa de passagem”, como já citado neste trabalho. Dentre outros parâmetros, a norma estabelece uma metodologia para o cálculo da largura da faixa de servidão de uma LT. No caso de um único circuito, a largura mínima, L , da faixa é dada pela Equação 2 abaixo:

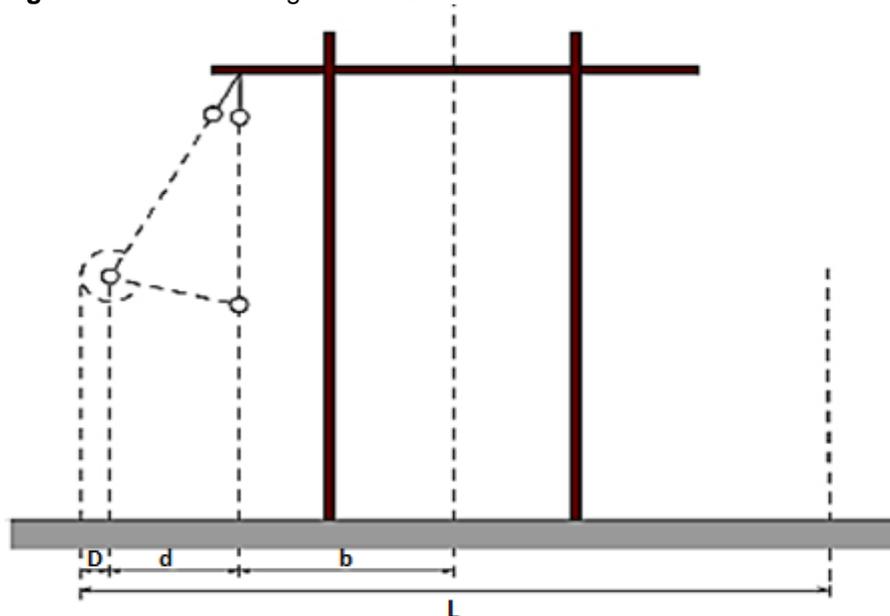
$$L = 2 \times (b + d + D) \quad (2)$$

Na qual:

- b - Distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado deste eixo.
- d - Soma das projeções horizontais da flecha do condutor e do comprimento da cadeia de isoladores, após seu deslocamento angular devido à ação do vento.
- D - Dado por $D_U/150$, valor mínimo de 0,5 m.
- D_U - Tensão máxima de operação da linha, em kV.

A Figura 5 mostra uma linha de transmissão com os parâmetros L , b , d e D .

Figura 5: Cálculo da largura da faixa de servidão de uma linha de transmissão.



Fonte: KUSTER, 2011.

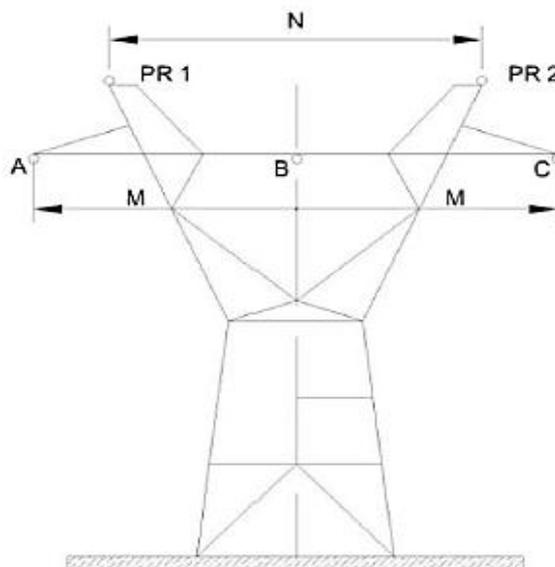
3.3 Procedimento de medição do campo elétrico

A Resolução Normativa da ANEEL nº 616 define os procedimentos de medição para a caracterização dos campos elétricos de baixa frequência (ONS, 2014).

3.3.1 Caracterização do ambiente de medição

Para avaliação do ambiente eletromagnético foi selecionado um vão real entre as torres 3 e 4, de um sistema composto por duas linhas de transmissão: a linha de transmissão que interliga a Usina Hidrelétrica de Furnas à Subestação de Estreito (LTFUES) e a linha de transmissão que interliga a Usina Hidrelétrica de Furnas à Subestação de Mascarenhas de Moraes (LTFUMM). Ambas possuem a operação em 345 kV e pertencem à empresa Eletrobras Furnas, localizadas no município de São José da Barra – Minas Gerais. As silhuetas utilizadas nas estruturas 3 e 4 das duas LT's podem ser vistas na Figura 6 e a Figura 7 mostra o cenário real do sistema.

Figura 6: Silhueta das torres 3 e 4 do sistema LTFUES / LTFUMM.



Fonte: Eletrobras Furnas.

Figura 7: Linhas LTFUES e LTFUMM, respectivamente.



Fonte: Própria autora.

A área do vão escolhido é compreendida pelos limites da faixa de servidão (50 m para cada lado do eixo), totalizando 160 m de comprimento, o qual é de uso exclusivo para funcionários da empresa, já que o vão se localiza na entrada da oficina do departamento de ensaios e apoio à manutenção de Furnas.

A empresa Eletrobras possui um setor de calibrações em instrumentos de trabalho com certificação do INMETRO, assim antes das medições dos campos elétricos, foram realizadas as calibrações em todos os instrumentos que iriam ser utilizados. Foram utilizados para as medições: um medidor de temperatura, um medidor de altura dos cabos condutores das linhas de transmissão e um medidor de campo elétrico, apresentados pelas Figuras 8, 9 e 10.

Figura 8: Medidor de temperatura e umidade relativa do ar - MT-242. Fab. Minipa.



Fonte: ANT ferramentas.

Figura 9: Medidor de altura dos cabos condutores - Saparulle.



Fonte: Própria autora.

Figura 10: Medidor de campo elétrico - EFA 300. Fab. Narda.

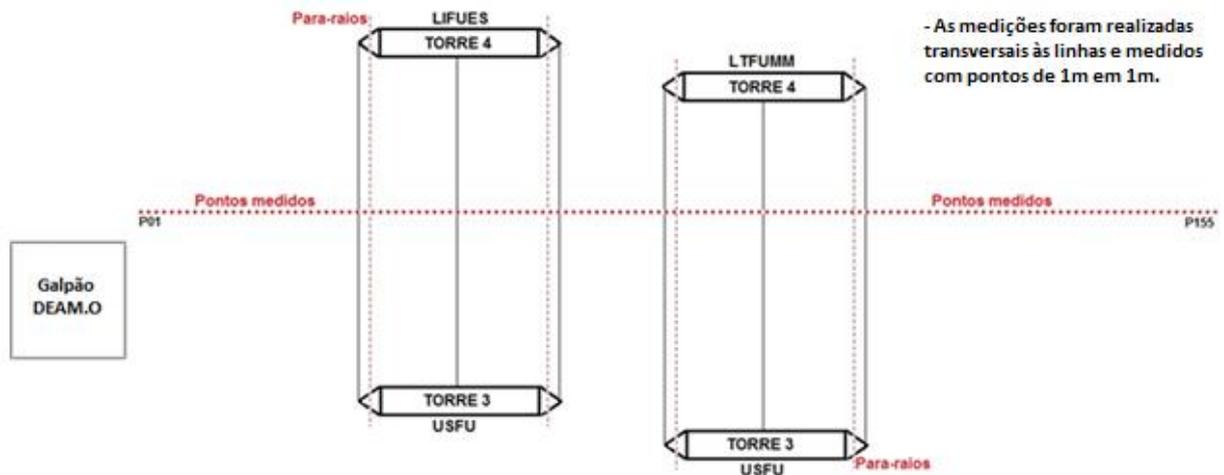


Fonte: Própria autora.

O medidor de intensidade de campo elétrico é composto por duas partes: a sonda ou elemento sensor de campo e o indicador, que processa o sinal da sonda e indica o valor eficaz (rms) da intensidade do campo elétrico em um visor. O sensor utilizado neste instrumento tem o formato de um cubo e possui três eixos, constituído por três pares de placas paralelas arranjadas ortogonalmente, permitindo assim a medição do campo em três direções (NARDA, EFA 300). Segundo recomendações, a medição do campo elétrico deve ser feita a 1 metro do solo, sendo necessário o auxílio de um tripé, que no nosso caso foi reajustado a cada ponto de medição. O operador do instrumento deve ficar no mínimo 2,5 m de distância do sensor, para evitar distorções significativas na medição, assim é utilizado um cabo de fibra ótica para conectar o sensor à unidade de analisador de campo.

As medições dos níveis de campos elétricos ocorreram nos dias 13, 14 e 17 de agosto de 2015, e os pontos de medição transversal foram feitos para intervalos de distâncias de 1m em 1m, como mostra o esquemático deste cenário na Figura 11.

Figura 11: Esquemático do cenário da medição de campo elétrico.



Fonte: Própria autora.

Durante os três dias de coleta de dados foram medidas também a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2: Registros das características de medição.

Datas das medições	Horário	Temperatura	Umidade relativa do ar
13/08/2015	09:10 às 11:00 horas	21,1°C	36 %
14/08/2015	10:03 às 11:10 horas	25,9°C	34 %
17/08/2015	09:05 às 11:00 horas	25,9°C	40 %

Fonte: Própria autora.

Foram determinadas as alturas dos cabos condutores das três fases em relação ao solo, as distâncias entre as fases, as distâncias entre os subcondutores (já que em ambas as linhas, possuem dois subcondutores por fase), entre outras características geométricas, mostradas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Características físicas do sistema Furnas - Estreito (LTFUES).

Configuração Geométrica – Sistema Furnas/Estreito	
Tensão de operação	345 kV
Nº condutores/fase	2
Código condutores/fase	Rail
Tipo condutores/fase	CAA
Nº cabos para-raios	2
Tipos cabos para-raios	Aço Galvanizado
Código cabos para-raios	EHS
Distância subcondutores	0,457 m
Altura Fase A	10,08 m
Altura Fase B	10,35 m
Altura Fase C	11,00 m
Altura para-raios 1	15,72 m

Configuração Geométrica – Sistema Furnas/Estreito	
Altura para-raios 2	16,90 m
Diâmetro cabos Fases	29,59 mm
Diâmetro cabos para-raios	9,52 mm
Distância entre as fases	8,40 m
Distância entre os para-raios	6,20 m

Fonte: Própria autora, com auxílio de Eletrobrás Furnas.

Tabela 4: Características físicas do sistema Furnas - Mascarenhas de Moraes (LTFUMM).

Configuração Geométrica – Sistema Furnas/Mascarenhas de Moraes	
Tensão de operação	345 kV
Nº condutores/fase	2
Código condutores/fase	Rail
Tipo condutores/fase	CAA
Nº cabos para-raios	2
Tipos cabos para-raios	Aço Galvanizado
Código cabos para-raios	EHS
Distância subcondutores	0,457 m
Altura Fase A	15,32 m
Altura Fase B	15,45 m
Altura Fase C	17,01 m
Altura para-raios 1	21,77 m
Altura para-raios 2	25,98 m
Diâmetro cabos Fases	29,59 mm

Configuração Geométrica – Sistema Furnas/Mascarenhas de Moraes	
Diâmetro cabos para-raios	9,52 mm
Distância entre as fases	8,40 m
Distância entre os para-raios	6,20 m

Fonte: Própria autora, com auxílio de Eletrobrás Furnas.

3.4 Cálculo do campo elétrico

Os campos eletromagnéticos são regidos pelas leis do eletromagnetismo, também conhecidas como Leis de Maxwell. Um sistema de estudo de níveis de campos elétricos de uma linha de transmissão operando em regime permanente, possibilita o desacoplamento dos campos eletromagnéticos, como explicado anteriormente. Assim, através da manipulação matemática da 3ª equação de Maxwell (Lei de Gauss) é possível determinar a formulação do campo elétrico.

Partindo primeiramente da dedução da densidade de fluxo elétrico \vec{D} , onde \vec{D} é um campo vetorial que relaciona o campo elétrico com o meio material, conforme mostram as Equações 3 e 4.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (4)$$

Onde:

- ε = Permissividade;
- ε_0 = Permissividade do vácuo;
- ε_r = Permissividade do meio.

A densidade de fluxo elétrico, \vec{D} , independe do meio em que está diferentemente do campo elétrico, \vec{E} , que é dependente do meio. Assim o fluxo elétrico, Ψ , é definido em termos de \vec{D} , como mostra a Equação 5.

$$\Psi = \int \vec{D} \cdot d\vec{s} \quad (5)$$

A Lei de Gauss estabelece que o fluxo elétrico total, Ψ , através de uma superfície fechada é igual à carga total encerrada por essa superfície, Q_{env} , como mostram as Equações 6 e 7.

$$\Psi = Q_{env} \quad (6)$$

$$\Psi = \oint D \cdot \vec{d}_s = \int (\vec{\nabla} \cdot \vec{D}) \vec{d}_v = Q_{env} \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (8)$$

A Lei de Gauss, dada pela Equação 8 é uma alternativa de estabelecer a Lei de Coulomb é, também, uma forma mais fácil de obter a densidade linear de carga para distribuições simétricas de carga, a partir da densidade volumétrica de carga, ρ_v .

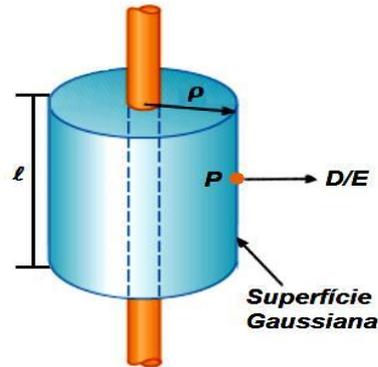
O método de aplicar a Lei de Gauss para determinar o campo elétrico começa pela verificação da existência de simetria. Logo após, se faz necessário à construção da superfície gaussiana, que seja ortogonal ou tangencial a essa superfície, no qual:

- Se $\vec{D} = \text{Normal} \rightarrow \vec{D} \cdot \vec{d}_s = D \cdot d_s$;
- Se $\vec{D} = \text{Tangencial} \rightarrow \vec{D} \cdot \vec{d}_s = 0$.

O foco deste trabalho é a análise e o cálculo do campo elétrico em linha de transmissão, logo, a configuração da superfície gaussiana estudada será a de uma linha infinita de carga.

Suponha uma linha infinita de carga uniformemente distribuída com ρ_L (C/m) ao longo do eixo z , a superfície gaussiana é o cilindro azul que passa pelo ponto P , ilustrado pela Figura 12.

Figura 12: Superfície Gaussiana em torno de uma linha infinita de carga.



Fonte: Própria autora.

Sendo:

- $\vec{D} = D \hat{a}_\rho$;
- $d_S = \rho d_\phi d_z \hat{a}_\rho$ (coordenada cilíndrica).

Conseguimos realizar a dedução do campo elétrico, por meio das Equações 9, 10, 11 e 12.

$$\Psi = \oint D \cdot \vec{d}_S = Q_{env} = \rho_L \cdot l \quad (9)$$

$$D \int_0^l \int_0^{2\pi} \rho d_\phi d_z = \rho_L \cdot l \quad (10)$$

$$D \cdot \rho \cdot 2\pi \cdot l = \rho_L \cdot l \quad (11)$$

$$\vec{D} = \frac{\rho_L}{2\pi\rho} \hat{a}_\rho \quad (12)$$

Como todas as expressões de campo elétrico podem ser escritas em função da densidade de fluxo elétrico, \vec{D} , basta multiplicar \vec{E} , por ϵ_0 , pois $\vec{D} \parallel \vec{E}$.

Assim o campo elétrico pode ser determinado pela Equação 13.

$$\vec{E} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0\rho} \hat{a}_\rho \quad (13)$$

Em que:

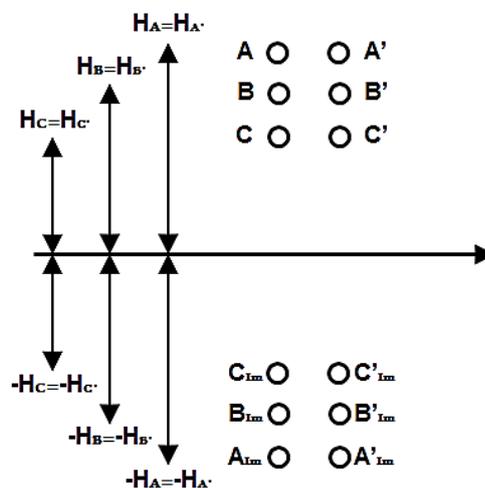
- ϵ_0 = Permissividade do vácuo (\approx ar: $8,854 \times 10^{-12}$ [F/m]);
- ρ_L = Densidade linear de carga, distribuída na superfície gaussiana dos condutores;
- \hat{a}_ρ = Vetor unitário que fornece a direção e o sentido de \vec{E} ;
- ρ = Distância vertical entre a distribuição de carga e o ponto de observação P .

Contudo, após a dedução da formulação do campo elétrico, considerando o sistema de LT's como de uma linha infinita de carga, para o cálculo do mesmo é necessário à aplicação de dois métodos: o Método das Imagens (MI) e do Teorema da Superposição.

Aplica-se, inicialmente, o MI ao sistema sob estudo, como ilustra a Figura 13. Este método permite transformar o sistema físico real (compostos de dois meios semi-infinitos: ar e solo) em um sistema equivalente (composto de um meio infinito: o ar), substituindo assim o efeito do solo por condutores imagens, posicionados de forma simétrica em relação aos condutores reais.

A superfície do solo altera o campo elétrico da linha de transmissão influenciando a capacitância, mas como a teoria das imagens estabelece que em uma dada configuração formada por uma carga próxima a um plano infinito (condutor perfeito de potencial nulo), o plano pode ser substituído pela própria imagem das cargas com sinal oposto, assim considera-se o solo como um condutor elétrico perfeito (condutividade (σ) tende a infinito) (SADIKU, 2004).

Figura 13: Método das imagens aplicado a um sistema genérico.



Fonte: Própria autora.

A aproximação do solo por um condutor elétrico perfeito é validada por dois fatores principais:

- Baixa frequência de operação da linha ($f = 60 \text{ Hz}$), permitindo uma modelagem eletromagnética no âmbito da quase estática.
- Tempo de relaxação (τ) associada à redistribuição de cargas elétricas no solo, muito inferior ao período do sinal senoidal da tensão de linha.

Por estes dois fatores o MI é considerado como Método das Imagens Ideais (MII). Contudo, é válido destacar que, com a aplicação do MII, o cálculo do campo elétrico somente pode ser realizado na região definida de $z > 0$, onde as fontes estão imersas no ar. Portanto, em um sistema físico equivalente, os valores calculados de \vec{E} para $z < 0$, não possuem significado físico, uma vez que no sistema físico real $\vec{E} = 0$ para $z < 0$, tendo em vista que o solo é modelado como um condutor elétrico perfeito. Mas mesmo considerando a condutividade do solo finita, o campo elétrico em termos práticos não penetra no solo, assim somente objetos e seres vivos acima do solo sofrem influência do acoplamento elétrico (modo capacitivo) como exemplo, as linhas de transmissão, que é o caso abordado e analisado neste trabalho.

Considerando um sistema genérico constituído de apenas um condutor real (R), um condutor imagem (I) e pelo ar (meio), é possível calcular o campo elétrico em um ponto de observação arbitrário (P), já que o mesmo é gerado pelas distribuições lineares de carga do condutor real e de sua imagem. Assim, com a aplicação do MII é possível determinar o valor deste campo elétrico a partir do conhecimento da distância entre P e a projeção vertical do mesmo em R, da distância entre P e a projeção vertical do mesmo em I, do valor do vetor unitário que define a direção e o sentido de R para P, e do valor do vetor unitário que define a direção e o sentido de I para P.

Como o sistema (linha, ar, solo) sob estudo é considerado linear, utiliza-se o Teorema da Superposição para o cálculo do campo elétrico total, ou seja, o campo elétrico produzido por todos os condutores do sistema. Assim a expressão geral de campo elétrico mostrada na Equação 13, para qualquer ponto P, para $z > 0$, assume a seguinte formulação da Equação 14.

$$\vec{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{K=1}^{N_{cond}} \rho_{LK} \left(\frac{\hat{a}\rho_{RK}}{\rho_{RK}} - \frac{\hat{a}\rho_{IK}}{\rho_{IK}} \right) \quad (14)$$

Na qual:

- N_{cond} = Número de condutores (fases e para-raios);
- ρ_{LK} = Densidade linear de carga do k-ésimo condutor;
- $\hat{\rho}_{RK}, \hat{\rho}_{IK}$ = Vetores unitários dos condutores reais e suas imagens;
- ρ_{RK}, ρ_{IK} = Distância vertical entre os condutores reais e imagens em relação ao ponto de observação P.

Porém, as distribuições de carga ainda estão previamente desconhecidas, em todos os condutores. Esta determinação é feita com o auxílio do Método de Simulação de Cargas (MSC) (SINGER, 1973). A maioria dos sistemas de transmissão em alta tensão apresentam uma geometria muito complexa, o que praticamente inviabiliza o cálculo do campo elétrico de forma analítica. E um dos métodos mais utilizados para a resolução do problema em questão, é o MSC, que envolve a solução de uma quantidade relativamente reduzida de equações lineares em um tempo computacional curto, já que realiza a substituição das distribuições de cargas contínuas reais sobre a superfície dos condutores, por um conjunto discreto de distribuições de cargas fictícias (CLAYTON, 1997) e (EPRI, 1987). Estas cargas fictícias são determinadas respeitando as condições de contorno do problema.

Devido à simetria cilíndrica do sistema em estudo, as distribuições de carga dos condutores fases e para-raios, são substituídas por linhas infinitas de cargas (ρ_L [C/m]). Mas de acordo com método, primeiramente é necessário encontrar os coeficientes da matriz de Maxwell, cujos elementos são obtidos genericamente pelas Equações 15 e 16.

- Para $M = N$ (elementos da diagonal principal):

$$P_{MN} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{4H_M}{d_M} \right) \quad (15)$$

- Para $M \neq N$ (demais elementos da matriz):

$$P_{MN} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{(Y_M - Y_N)^2 + (H_M + H_N)^2}{(Y_M - Y_N)^2 + (H_M - H_N)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Em que:

- M e N = Podem ser quaisquer dois condutores do sistema sob estudo (fase e fase, fase e para-raios, para-raios ou para-raios);
- Y_M, H_M e Y_N, H_N = Coordenadas no plano yz, de M e N respectivamente;
- d_M = Diâmetro do M -ésimo condutor.

Em seguida, por meio Equação 17 resolve-se então o sistema de equações lineares, descrito pelo MSC.

$$[P] = [\rho_L] \cdot [V] \therefore [\rho_L] = [P]^{-1} \cdot [V] \quad (17)$$

Solucionando a Equação 17, através do conhecimento do vetor de tensões $[V]$ (fasores de tensão dos condutores do sistema) e da matriz de coeficientes de potenciais de Maxwell $[P]$, é possível determinar as densidades lineares de carga de cada condutor real (ρ_L) e assim, determinamos o campo elétrico \vec{E} gerado por uma linha de transmissão, utilizando a Equação 14.

A ferramenta computacional desenvolvida utiliza a metodologia de cálculo descrita anteriormente e permite o cômputo do campo elétrico para diferentes configurações de linhas de transmissão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a definição das metodologias adotadas para a determinação do campo elétrico foi desenvolvida uma ferramenta computacional que possibilita o cálculo de qualquer sistema de LT. Esta rotina computacional é aplicada a diversos sistemas de linhas de transmissão encontrados nas literaturas, de forma a validar a rotina e assim possibilitar uma análise completa do caso sob estudo.

Como meio de comparações, foram utilizadas as formulações do erro dadas pelas Equações 18, 19 e 20 (PINHEIRO, CUNHA, CARVAJAL, GOMES, 2009), que permitem o cálculo da diferença percentual máxima, do erro quadrático e do erro quadrático médio dos níveis de campos elétricos encontrados.

$$\text{Erro absoluto} = |E_{\text{medido}} - E_{\text{calculado}}| \quad (18)$$

$$\text{Erro quadrático} = |\text{Erro absoluto}|^2 \quad (19)$$

$$\text{Erro quadrático médio} = \sum \frac{\text{Erro quadrático}}{\text{Número de posições}} \quad (20)$$

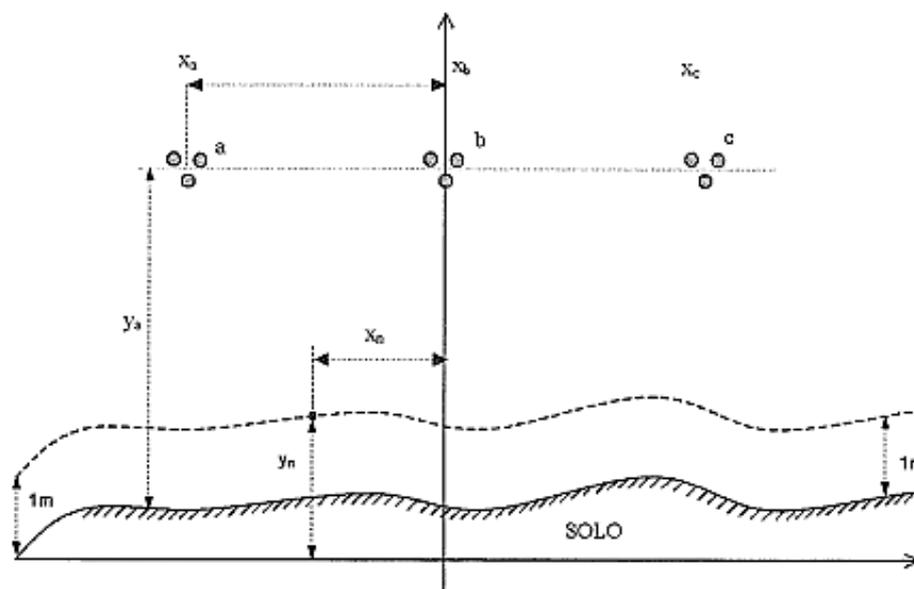
4.1 Validação da rotina computacional

Para a validação da rotina computacional foram utilizadas quatro referências presentes na literatura, com diferentes sistemas de transmissão em alta tensão.

A. SISTEMA 500 kV – Circuito Simples (GUIMARÃES, 2005)

Em 2005, Guimarães realizou medições e simulações computacionais de níveis de campos elétricos gerados por uma linha de transmissão de 500 kV, com circuito simples, configuração horizontal, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada no sistema A.

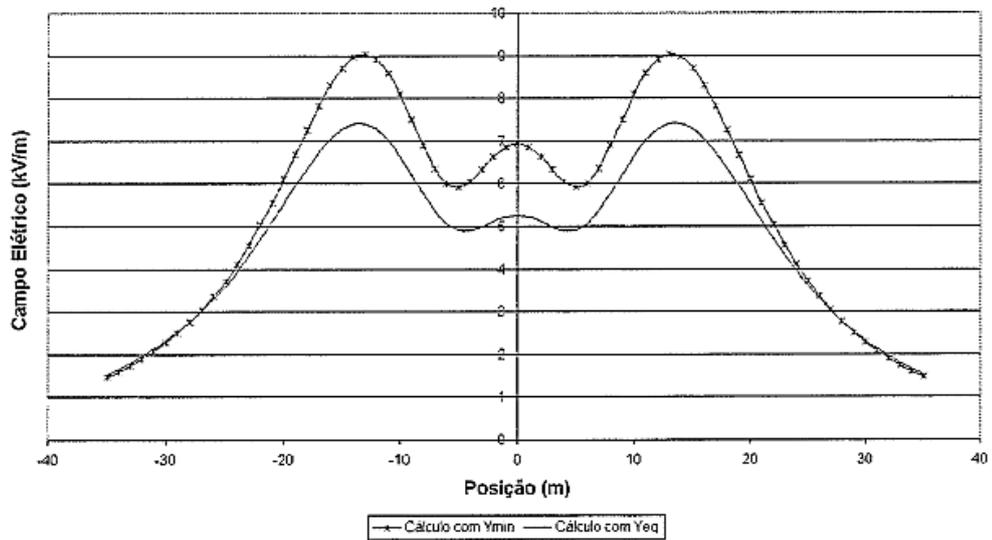


Fonte: GUIMARÃES, 2005.

A linha de transmissão do sistema A possui três condutores por fase de 28,74 mm de diâmetro e espaçados de 0,457 m. As distâncias entre o eixo de simetria e as fases são de 12 m e as alturas das fases em relação ao solo (Y_A , Y_B e Y_C) variam de 10 a 25 m em função do relevo irregular (não plano). Como há uma variação das alturas para cada ponto do sistema, considera-se uma altura equivalente para os condutores de 12,5 m.

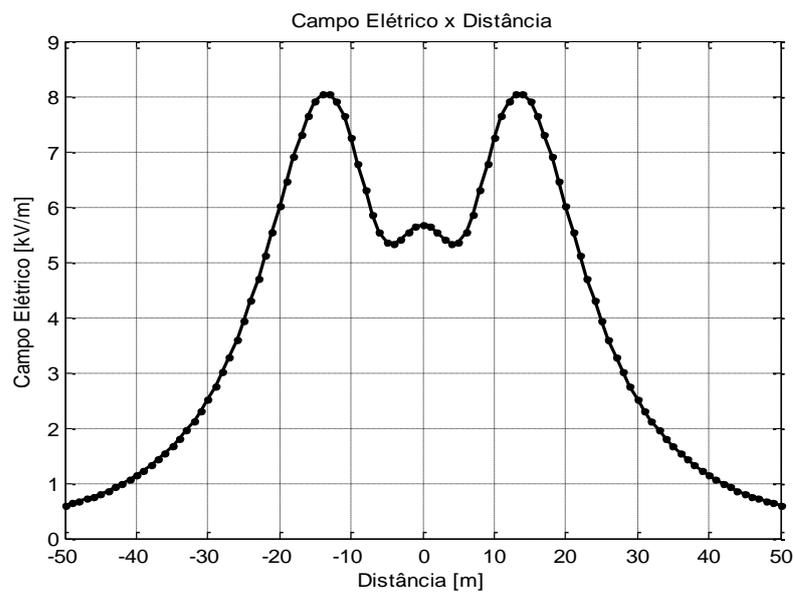
As Figuras 15 e 16 ilustram, respectivamente, os resultados medidos e calculados por (GUIMARÃES, 2005) e os obtidos pelo programa computacional desenvolvido. Ao comparar os resultados, alguns pontos merecem destaque. Observa-se que os perfis transversais seguem a mesma tendência e o valor máximo de campo elétrico encontrado pela ferramenta desenvolvida foi de 8,05 kV/m, sendo que o valor máximo encontrado pela literatura, para a altura equivalente dos condutores de 12,5 m é de 7,4 kV/m. Assim a diferença máxima percentual encontrada na comparação é de 8,8%. É importante ressaltar que, para a comparação com este sistema a formulação utilizada na rotina computacional foi à mesma utilizada pela própria literatura.

Figura 15: Perfil do campo elétrico obtido pela literatura ao nível do solo, considerando $Y_{eq} = 12,5m$.



Fonte: GUIMARÃES, 2005.

Figura 16: Perfil do campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido, para o sistema A considerando $Y_{eq} = 12,5m$.

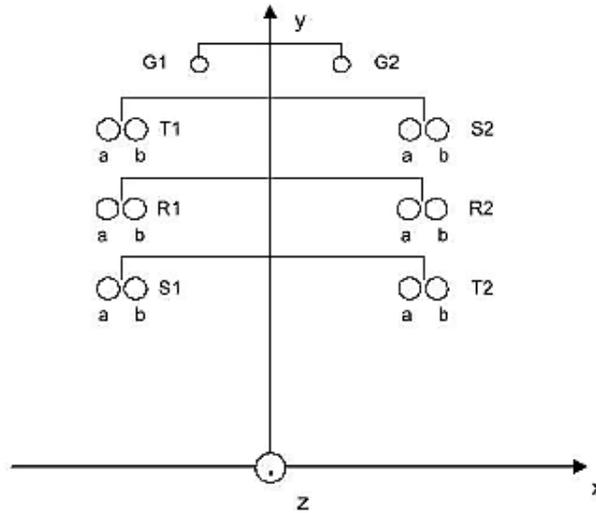


Fonte: Própria autora.

B. SISTEMA 400 kV – Circuito Duplo (DESCHAMPS, 2000)

Em 2000, Deschamps fez medições de campos elétricos a 1 m do solo, de uma linha de transmissão com circuito duplo, conforme mostra a Figura 17.

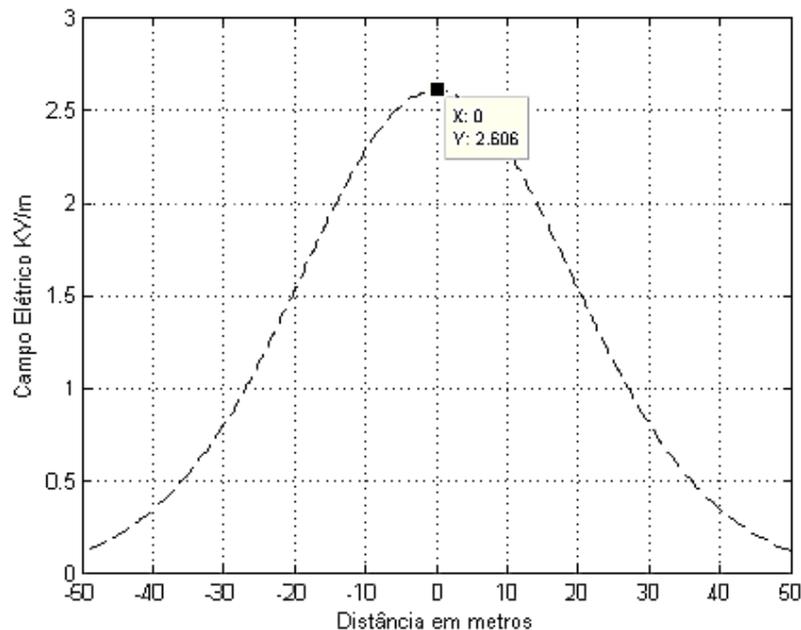
Figura 17: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada no sistema B.



Fonte: DESCHAMPS, 2000.

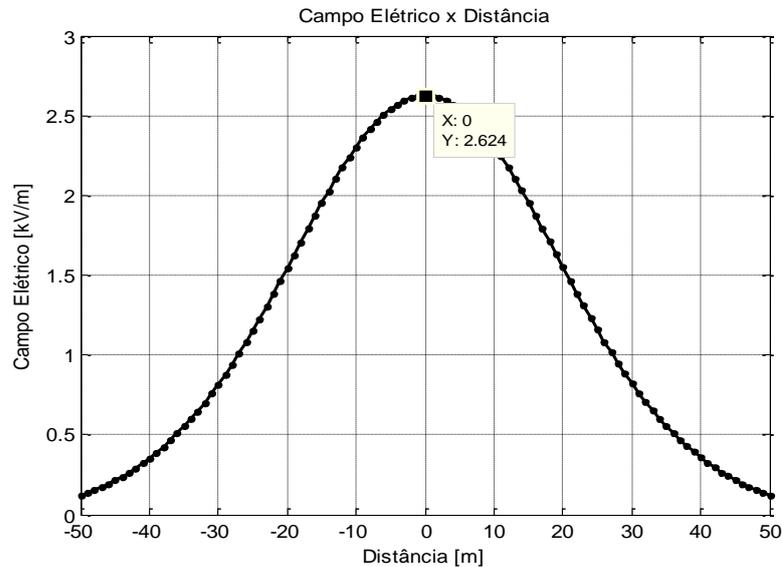
O sistema B possui fases compostas por feixes com dois subcondutores por fase, espaçados de 0,40 m e com diâmetro de 31,8 mm. As distâncias entre o eixo de simetria e as fases são de 8 m e as alturas das mesmas, HA, HB, HC, HA', HB' e HC' em relação ao solo são de: 45 m, 37,5 m, 30 m, 45,5 m, 37,5 m e 30 m, respectivamente. As distâncias dos cabos para-raios entre o eixo de simetria são de 6 m e as alturas são de 52,5 m. A linha encontra-se em um relevo inclinado.

Figura 18: Perfil do campo elétrico obtido pela literatura ao nível do solo.



Fonte: DESCHAMPS, 2000.

Figura 19: Perfil do campo elétrico obtido pelo programa computacional desenvolvido, para o sistema B.



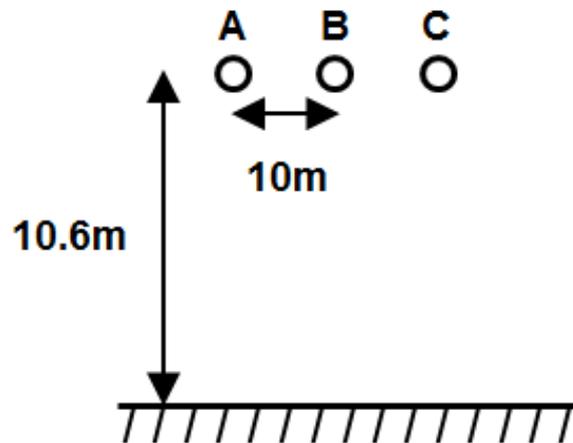
Fonte: Própria autora.

As Figuras 18 e 19 ilustram, respectivamente, os resultados medidos e calculados pela literatura e os obtidos pelo *software* produzido. Ao comparar os resultados, observa-se que os perfis transversais seguem a mesma tendência e a diferença máxima percentual encontrada na comparação é de somente 0,76%. Pois o máximo valor de campo elétrico encontrado por (DESCHAMPS, 2000) é de 2,60 kV/m e o valor obtido pela ferramenta desenvolvida foi de 2,62 kV/m.

C. SISTEMA 525 kV – Circuito Simples (EPRI, 1982)

Em 1982, em *Electric Power Research Institute* foram desenvolvidas várias simulações computacionais para o cálculo dos níveis de campos elétricos gerados por linhas de transmissão de diversas configurações. A configuração utilizada neste sistema é uma linha de 525 kV, de configuração horizontal e circuito simples com três subcondutores por fase, espaçados de 0,45 m e com diâmetro de 30 cm. As distâncias entre o eixo de simetria e as fases são de 10 m e as alturas das fases em relação ao solo HA, HB, HC são de 10,6 m. Os detalhes da disposição dos condutores podem ser vistos pela Figura 20.

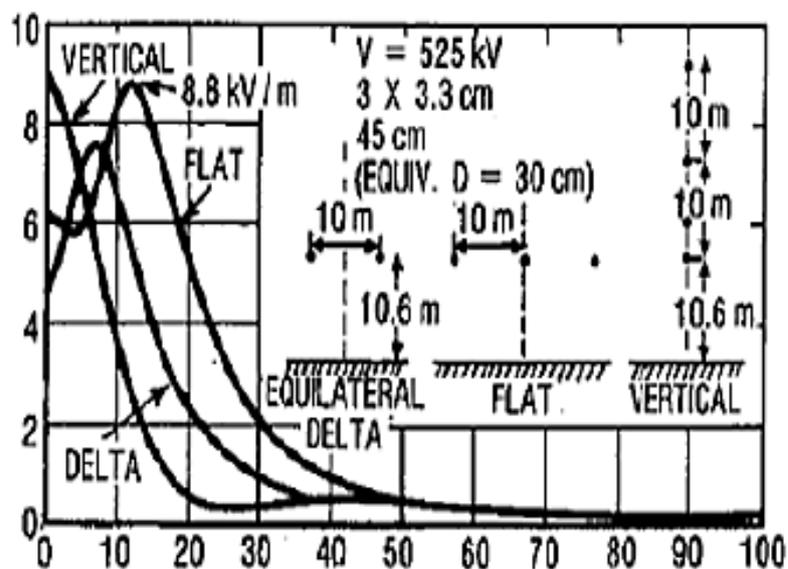
Figura 20: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada no sistema C.



Fonte: Própria autora.

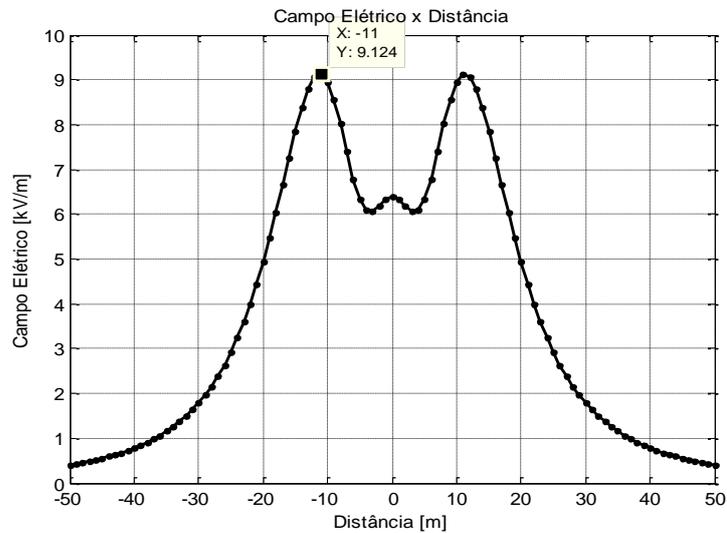
Analisando as Figuras 21 e 22, verifica-se que o valor máximo de campo elétrico encontrado por pela literatura (EPRI, 1982) considerando a configuração *flat* é de 8,8 kV/m e o valor obtido pela ferramenta desenvolvida referente a mesma configuração foi de 8,79 kV/m. Assim, além de apresentarem uma diferença máxima percentual referente aos máximos níveis obtidos de somente 0,1%, também apresentam um perfil transversal bastante semelhante.

Figura 21: Perfil do campo elétrico obtido pela literatura por meio de simulações computacionais.



Fonte: EPRI, 1982.

Figura 22: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido, para o sistema C.

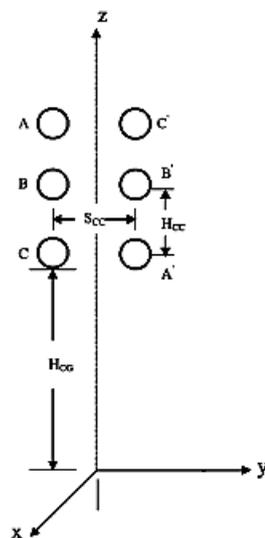


Fonte: Própria autora.

D. SISTEMA 275 kV – Circuito Duplo (ISMAIL, 2007)

Em 2007, Ismail apresentou os resultados de uma pesquisa que analisa o perfil transversal de campos elétricos gerados por distribuições de cargas de uma linha de transmissão de circuito duplo, típica do sistema de transmissão do Kuwait, ilustrada pela Figura 23.

Figura 23: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada no sistema D.

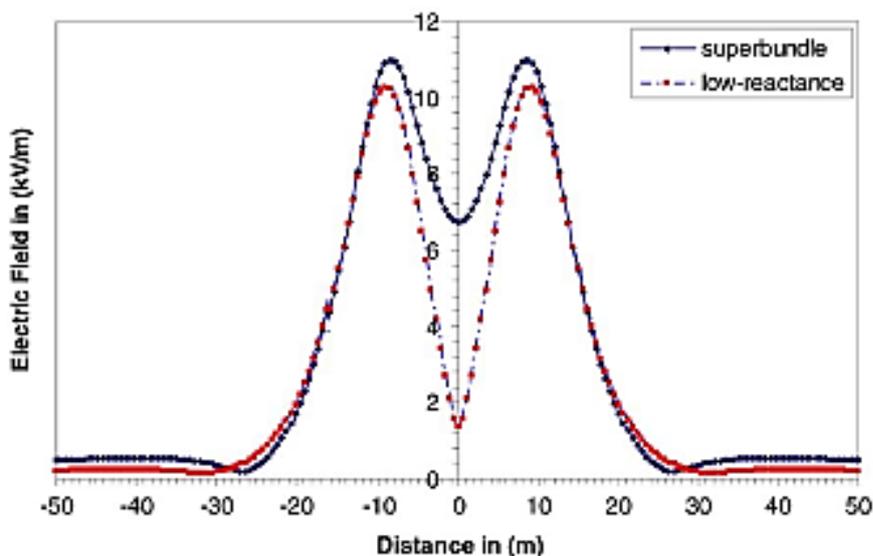


Fonte: ISMAIL, 2007.

A tensão de linha deste sistema é de 275 kV, as fases são compostas por um feixe com quatro subcondutores por fase, espaçados de 40 mm e com diâmetro de 11,28 mm. As distâncias entre o eixo de simetria e as fases são de 8,8 m e os valores das alturas das fases (A, B, C, A', B' e C') em relação ao solo são: 26 m, 17 m, 8 m, 8 m, 17 m e 26 m, respectivamente, simbolizando um sistema de baixa reatância.

A Figura 24 ilustra o resultado de campo elétrico obtido por (ISMAIL, 2007) sendo que o valor máximo de campo apresentado foi de 10,2 kV/m para a configuração de baixa reatância. A Figura 25 mostra o resultado obtido pela simulação computacional na ferramenta produzida e o valor máximo do campo elétrico encontrado para a mesma configuração foi de 10,58 kV/m. Observa-se que os perfis transversais seguem a mesma tendência e a diferença máxima percentual entre as curvas é de somente 3,7%.

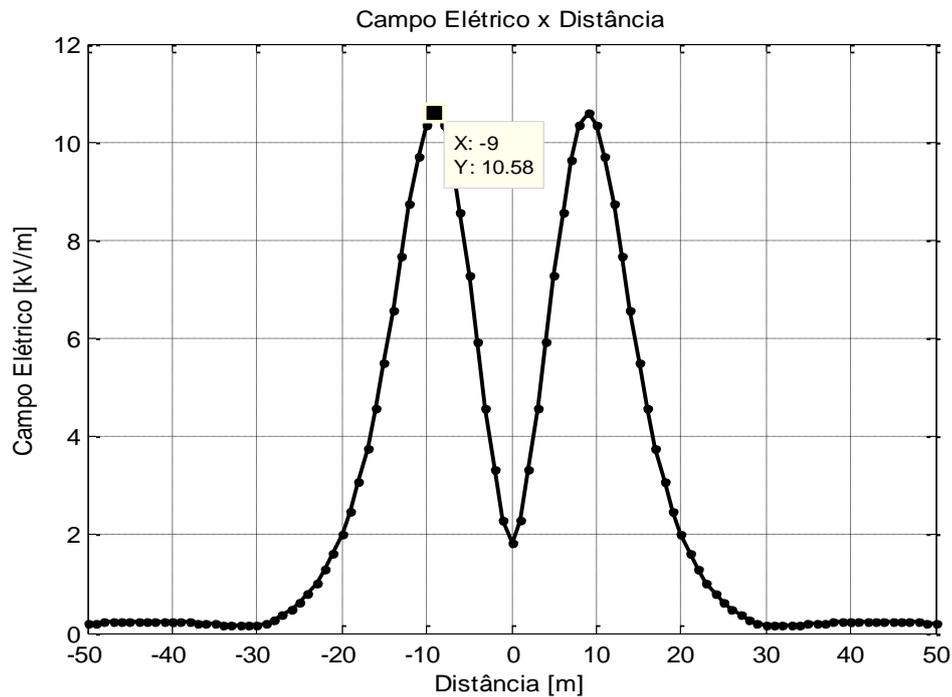
Figura 24: Perfil do campo elétrico obtido por simulações realizadas pela literatura.



Fonte: Ismail, 2007.

A validação da ferramenta computacional desenvolvida para cálculos dos campos elétricos foi feita por meio de comparações com outras referências apresentadas na literatura, conforme já destacado. Para todos os sistemas observou-se que os perfis transversais obtidos seguiram o mesmo comportamento de suas referências e apresentaram uma diferença máxima percentual de 8,8%.

Figura 25: Perfil do campo elétrico obtido pela simulação no *software* desenvolvido, para o sistema D.



Fonte: Própria autora.

4.2 Campo elétrico do sistema sob estudo: medidos e calculados

As medições dos níveis de campos elétricos do sistema pertencente à Eletrobras Furnas seguiram todas as recomendações da Resolução Normativa nº 616 - 2014, estabelecida pela ANEEL. As Figuras 26 e 27 ilustram, o perfil estrutural utilizado na terceira torre de ambas as linhas de transmissão, bem como demonstra o sistema real, composto pelas duas LT's, respectivamente.

As Figuras 28, 29 e 30, caracterizam o trecho estudado e mostra os procedimentos realizados nas medições dos níveis de campos elétricos.

Figura 26: Torre 3 do sistema LTFUES e LTFUMM, respectivamente.



Fonte: Própria autora.

Figura 27: Sistema sob estudo composto pela LTFUES e LTFUMM, respectivamente.



Fonte: Própria autora.

Figura 28: Trecho onde foi realizada a medição - Entrada da Oficina da Eletrobrás Furnas.



Fonte: Própria autora.

Figura 29: Realizando o processo de medição do campo elétrico.



Fonte: Própria autora.

Figura 30: Realizando o processo de medição juntamente com a funcionária de Furnas.



Fonte: Própria autora.

Por meio da Figura 31 é possível visualizar as duas partes que compõem o medidor de campo elétrico utilizado nas medições.

Figura 31: Medidor de campo elétrico EFA 300 e o suporte auxiliar de medição.

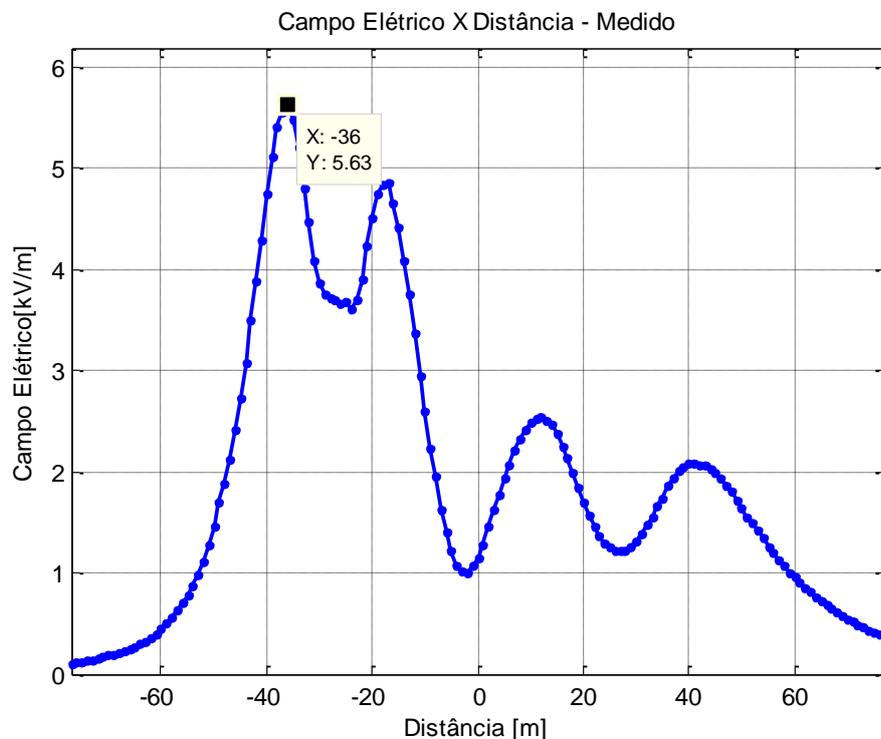


Fonte: Própria autora.



O perfil do campo elétrico encontrado nas medições pode ser visto na Figura 32 no qual o máximo valor de campo elétrico encontrado foi de 5,63 kV/m, entre as fases A e B da linha de transmissão que liga a Usina de Furnas à Estreito (LTFUES). Com estes resultados apresentados, pode-se concluir que de acordo com a norma, a exposição ao campo elétrico referente o *Público Geral* estão um pouco acima do limite permitido. Porém, o trecho de medição se caracteriza como *Público Ocupacional*, pois é de acesso exclusivo aos funcionários da empresa, e para este público os valores estão dentro dos limites recomendados.

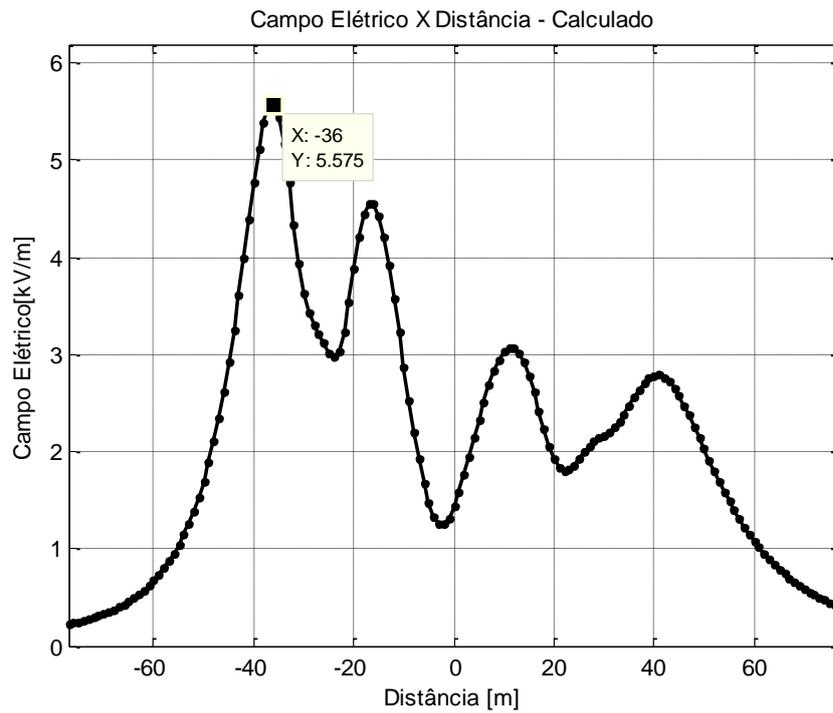
Figura 32: Perfil do campo elétrico encontrado na medição realizada.



Fonte: Própria autora.

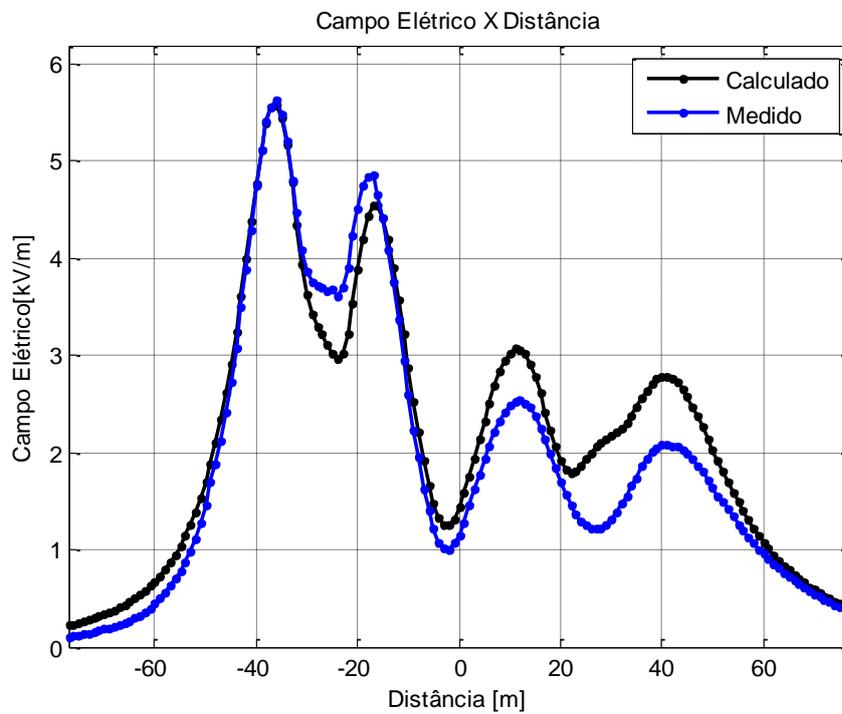
Utilizando os dados geométricos das linhas de transmissão sob estudo, juntamente com a ferramenta computacional desenvolvida, foi realizada uma simulação do sistema real e obteve-se um valor máximo de campo elétrico de 5,57 kV/m, como mostra a Figura 33. De acordo com a norma regulamentadora o valor encontrado está dentro dos limites aceitáveis para a caracterização do trecho, que mais uma vez, refere-se ao Público Ocupacional. Utilizando o mesmo *software* foi realizada a comparação entre a medição realizada e a simulação computacional, de modo a avaliar simultaneamente os dois níveis encontrados, conforme ilustra a Figura 34.

Figura 33: Perfil do campo obtido via simulação computacional.



Fonte: Própria autora.

Figura 34: Comparação entre os níveis de campos elétricos referentes à medição e a simulação computacional.

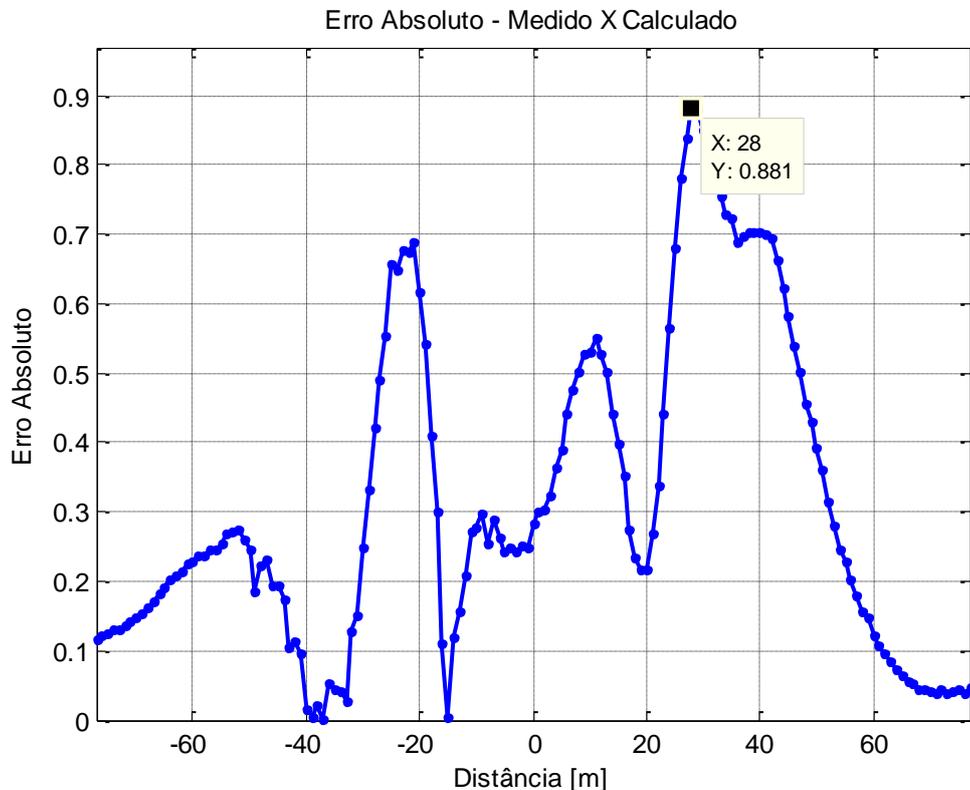


Fonte: Própria autora.

Ao comparar as duas curvas presentes na Figura 34 perceber-se que ambas apresentam um comportamento transversal semelhante, ratificando a eficiência da

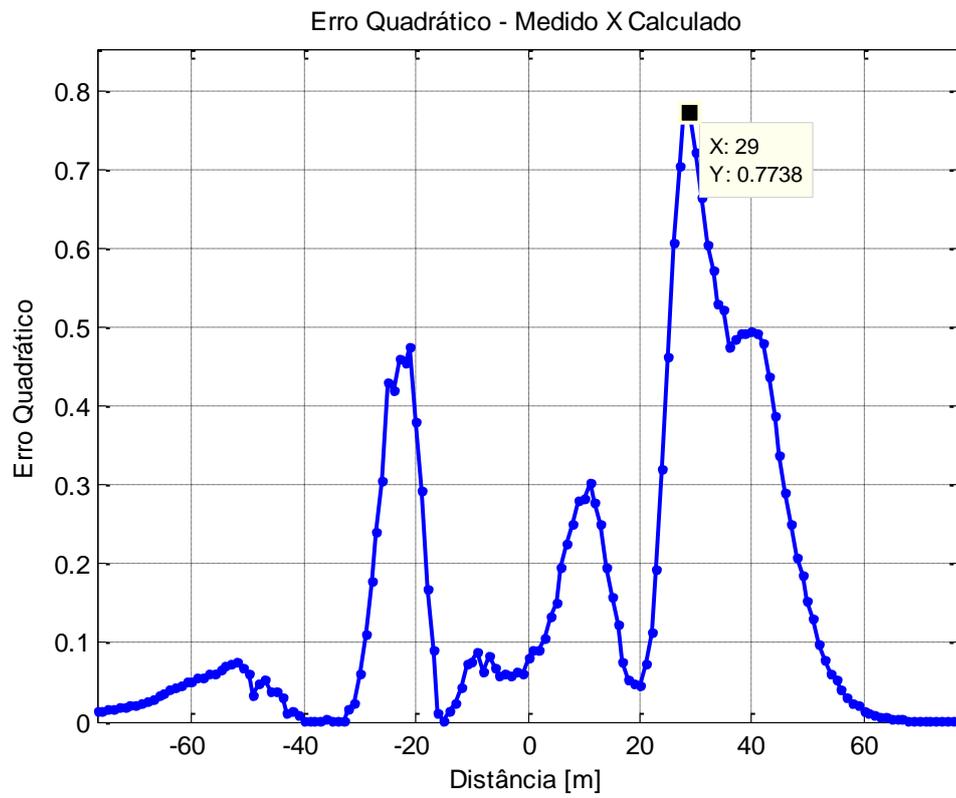
rotina computacional desenvolvida. A diferença percentual máxima entre o maior valor do nível de campo elétrico encontrado na medição em relação ao obtido pelo *software* foi de apenas 0,88%, como mostra a Figura 35. Este erro é justificado devido ao fato de que o cenário real da medição possui um relevo irregular (tipo declinado) e no momento da medição não foi realizada a compensação deste declive. E o *software* desenvolvido realiza o cálculo dos campos elétricos considerando o relevo plano e regular, assim a maior diferença no perfil das duas curvas é exatamente no local onde o trecho apresenta seu declive.

Figura 35: O erro absoluto devido às duas curvas.



Fonte: Própria autora.

Assim, a partir do erro absoluto é possível determinar o erro quadrático como mostra a Figura 36 e assim o erro quadrático médio obtido foi de apenas 0,153389. Logo, pode-se afirmar que a ferramenta produzida é eficiente, pois apresenta discordâncias pouco significativas com relação às medições.

Figura 36: Erro quadrático obtido via comparação.

Fonte: Própria autora.

5. CONCLUSÃO

Níveis elevados de campos elétricos podem apresentar riscos à segurança e à saúde de pessoas e animais que estejam presentes na faixa de servidão de linhas de transmissão, embora ainda não se tenha estudos conclusivos sobre tal fato. Mas em decorrência desta preocupação, órgãos regulamentadores estabelecem níveis máximos admissíveis para estes campos, tornando-se necessário adotar metodologias adequadas para as medições dessa grandeza. Os níveis de campos elétricos gerados por LT's dependem basicamente da configuração geométrica do sistema de transmissão e dos seus níveis de tensão. Assim, faz-se necessária uma avaliação dos níveis de campos elétricos gerados por distintas configurações de linhas, conhecidos também por sistemas.

O presente trabalho apresenta a comparação de níveis de campos elétricos de um sistema real realizado por meio do cálculo teórico via ferramenta computacional e por medições em campo do sistema. Os cálculos teóricos são realizados por meio de um algoritmo desenvolvido no *software* Matlab® e utilizam, como base da metodologia, as formulações de Maxwell juntamente com o método de simulação de carga (MSC), o método das imagens (MI) e o teorema da superposição.

A validação do *software* desenvolvido foi realizada por meio de comparações com outras referências apresentadas na literatura, e para todas as simulações realizadas observou-se que, tanto os perfis de campos elétricos, quanto os níveis de máximos e mínimos são muito próximos. A comparação entre os níveis de campos elétricos do sistema real obtidos via simulação computacional e os níveis obtidos pelas medições em campo apresentaram um resultado muito satisfatório, já que o erro máximo encontrado foi de apenas 0,88%. Ambos os valores máximos dos campos obtidos estavam dentro dos limites recomendados pelas normas para a incidência de campo referente ao Público Ocupacional.

Sendo assim, evidenciam-se a importância das medições, estudos e avaliações dos níveis de campos elétricos gerados por linhas de transmissão em alta tensão que se localizam próximos a áreas de ocupação, e também a relevância do uso de ferramentas computacionais para a determinação desses campos antes mesmo das instalações das LT's. O intuito seria de estimar e fiscalizar estes níveis

para que estejam sempre dentro dos limites recomendados, podendo ser aplicado em fases iniciais de projetos de novas linhas de transmissão, para uma estimativa dos valores do campo elétrico produzido por um determinado sistema.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se um estudo de otimização nas estruturas de suporte das linhas de transmissão com o intuito de determinar o tipo de configuração que produz os menores níveis de campos elétricos.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa 398 de 23/03/2010. Prazos para realização das medições de Campos Eletromagnéticos em instalações elétricas.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa 413 de 03/11/2010. Alteração dos prazos para realização das medições de Campos Eletromagnéticos em instalações elétricas.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa 616 de 01/07/2014.

ARDJOMAND, L. M.; FOGAÇA, A. L. B.; QUOIRIN, N. S. R.; ARAÚJO, R. L.; SAVISKI, A. L.; COSTA, A. A.; KUSTER, A. C. “**Medições de campos eletromagnéticos de baixas frequências em linhas de transmissão e subestações**”, XVIII SNPTEE, 16 a 21 de Outubro de 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Informação e documentação: citação em documentos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (ABNT). NBR 15415: Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz. Padronização. Rio de Janeiro, 2006.

CLAYTON, P. R.; KEITH, W. W.; SYED, N. A. *Introduction to Electromagnetic Fields*. WCB/MCGraw-Hill, 1997. ISBN 3ªEdition.

DECRETO LEI Nº 11934, DE 5 DE MAIO DE 2009. DIÁRIO OFICIAL DO BRASIL. Dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 mai. 2009. Seção 1, p. 1.

DESCHAMPS, F. *Technical guide for measurement of low frequency electric and magnetic fields near overhead power lines*. Electra, 243, n. pp. 22-39, 2000.

ELECTRIC Power Research Institute (EPRI). *Transmission Line Reference Book - 345kV and Above United States: General Electric Company*, 1982.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica. Linhas aéreas**. Volume 2. Rio de Janeiro, 1977. 588p.

GUIMARÃES, G. E. **Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV**. 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GUIMARÃES, G. E.; MURTA, M. L.; PAULINO, J. O. S.; SILVA, G. H. R.; SOUZA, A. C. S. “**Caracterização do ambiente eletromagnético em uma linha de transmissão de 500 kV – Cálculos e medições**”, XVIII SNPTEE, 16 a 21 de Outubro de 2005.

HAVAS, M. *Biological effects of low frequency eletromagnetic fields*. Chapter 10, In: D. Clements-Croome (Ed.). 2004. *Eletromagnetic environments and health in buildings*. Spon Press, London, 535 pp.

HAYT, W. H. **Eletromagnetismo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 1983. p. 254.

ICNIRP. *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*. International Commission on Non-ionizing Radiation Protection Technical Report, 2001.

ICNIRP. *Guidelines on protection against Non-ionizing radiation*. International Commission on Non-ionizing Radiation Protection Technical Report, Health and Physics – Volume 74, n.4 – 1998.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ENGINEERS, (IEEE) C95.6: IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3kHz. Nova Iorque, 2002.

ISMAIL, H. M. *Effect of Oil Pipelines Existing in an HVTL Corridor on the Electric-Field Distribution*. IEEE Transactionson Power Delivery, Outubro 2007. 2466-2472.

Koifman, S.; Land, M. G. P.; Moreno, R. F.; Koifman, R. J.; Mattos, I. E. **Avaliação dos efeitos biológicos em populações expostas a campos magnéticos de baixa frequência**. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL/CTEEP/FDTE, n. Ciclo 2002/2003, 2003.

KUSTER, A. C. **Avaliação de campos eletromagnéticos em regiões densamente povoadas**. 2011. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2ª Edição. São Paulo, 1992. 547p.

LIMA, G. F. Apresentação Disciplina: Instalações Elétricas de Alta Tensão – Transmissão em Alta Tensão – Aula 05. Instituto Federal do Rio Grande do Norte – IFRN. 2013.

LINET, M.S.; HATCH, E.E.;KLEINERMAN, R.A.; ROBISON, L.L.; KAUNE, W.T.; FRIEDMAN, D. R.; SEVERSON, R.K.; HAINES, C.M.; HARTSOCK, C. T. NIWA, S.; WALCHOLDER, S.; TARONE, R. E. *Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children*. New England of Medicine, 337: 1-7. 1997.

LOPES, J. C. R. **Campos elétricos e magnéticos**. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE COMPANHIAS DE ENERGIA ELÉTRICA (ABCE), 2012. Disponível em: <<http://www.abce.org.br/downloads/20120517APRESENTACAOABCE.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2016.

MATTOS, I. E.; KOIFMAN, S. **Mortalidade por câncer em trabalhadores de companhia geradora de eletricidade do Estado de São Paulo, Brasil**. Rev. Saúde Pública, 1996.

MCBRIDE, M. L.; GALLAGHER, R. P.; THÉRIAULT, G. *Power frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia*. American Journal of Epidemiology, 149: 831-842. 1999.

MORENO, R. F. **Campos eletromagnéticos e saúde humana: O fato e o mito**. XVIII SNPTEE, 18 Outubro 2005.

Narda Safety Test Solutions, EFA 300. **Analisador de campo eletromagnético, "Manual de operação"**.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE NACIONAL RESEARCH COUNCIL. "*Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields*." National Academy Press, Washington D. C. 1997.

NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD. *Review of the Scientific Evidence for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields*.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>.

PINHEIRO, J. I.; CUNHA, S. B.; CARVAJAL, S. R.; GOMES, G. C. **Estatística básica. A arte de trabalhar com dados**. Elsevier Editora, 2009.

PERRO, B. S. **Estudo dos campos eletromagnéticos em linhas de transmissão a frequência industrial**. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.

POLK, C. *Biological effects of low-level low-frequency electric and magnetic fields*. IEEE Transactions on Education, p. 243-249, v. 34, n. 3, ago. 1991.

RAMÍREZ, J. A. **Campos eletromagnéticos devido a sistemas de energia elétrica**. 2001. Anais do workshop nacional: Efeitos biológicos devidos à ação de campos eletromagnéticos, USP, São Paulo. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~jramirez/publicacoes/acn2001.pdf>> Acesso em: 03/09/2016.

SADIKU, M. N. O. **Elementos do Eletromagnetismo**: Bookman, 2004.

SAVITZ, D. A.; WATCHEL, H.; BARNES, F. A. et al. *Case-control study of childhood cancer and exposure to 60Hz magnetic fields*. Am J.Epidemiol., 128,10. 1988.

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

Tynes e Haldorsen (1997) – TYNES, T. & HALDORSEM, T. 1997. *Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines*. American Journal of Epidemiology, 145: 219-226.

VIERA, H. R. **Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos**. 2013. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São João Del Rei, Minas Gerais.

WERTHEIMER, N.; LEEPER, E. *Electrical wiring configurations and childhood cancer*. Am. J. Epidemiol., 109, 1979.

WHO Environmental Health Critreria – (EHC)”, OMS – Critérios de Saúde Ambiental, WHO, 2007.

APÊNDICE A – Fluxograma da rotina computacional