

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

João Alves da Silva Neto

**Estudo dos Efeitos Corona, Rádio Interferência e Níveis de Ruído e
Intensidade de Campos Elétricos e Magnéticos Produzidos por Li-
nhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.**

**Área de Concentração: Sistemas Elétricos
de Potência**

Orientador: Robson Celso Pires

**Itajubá
Setembro de 2014**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

João Alves da Silva Neto

**Estudo dos Efeitos Corona, Rádio Interferência e Níveis de Ruído e
Intensidade de Campos Elétricos e Magnéticos Produzidos por Li-
nhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 29 de setembro de 2014, conferindo ao autor o título de ***Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica***.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Robson Celso Pires (Orientador)

Prof. Dr. José Feliciano Adami

Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez

**Itajubá
Setembro de 2014**

Dedicado à minha mãe,

Denize Vilhena Borges Silva.

“Um dia aprendi que sonhos existem

para tornar-se realidade.

E, desde aquele dia, já não durmo pra descansar.

Simplesmente durmo pra sonhar.”

(Walt Disney)

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida e por sempre amparar minha família em todas as circunstâncias da vida.

Ao meu orientador Robson Celso Pires, por me acolher, ensinar, orientar e revisar este trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, pelos conhecimentos transmitidos desde os tempos de graduação.

À minha mãe Denize Vilhena Borges Silva, responsável por todo o meu caminho trilhado até aqui.

Aos meus irmãos Luís Otávio e Thaisa pela amizade sincera.

À minha companheira e namorada Nádia, por todo o amor, paciência e apoio.

Aos meus amigos de mestrado, pelos momentos que passamos juntos, em especial à Luís Félber, Thiago Pereira e José Filho.

À CAPES, pelo apoio financeiro prestado, sendo imprescindível no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho faz um breve levantamento histórico dos efeitos eletromagnéticos oriundos de uma linha de transmissão de energia. Estes efeitos eletromagnéticos denominados de campo elétrico, campo magnético, gradiente de potencial na superfície do condutor, nível de ruído audível e rádio interferência tiveram suas respectivas equações matemáticas descritas. Diante das respectivas equações matemáticas, é possível obter o perfil lateral de campo magnético, campo elétrico, ruído audível e rádio interferência através de rotinas programadas na plataforma MATLAB®. Todas estas rotinas são validadas. Estes parâmetros elétricos são analisados em conjunto com o procedimento de cálculo da faixa de segurança de uma LT. O cálculo da faixa de segurança é baseado na Norma NBR 5422. Os valores limites de campo elétrico e magnético são aferidos na Resolução Normativa N° 398, de 23 de março de 2010 da ANEEL. Os valores de ruído audível e rádio interferência são verificados no Submódulo 2.4, Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão Aérea da ONS. Por fim, um caso base de uma linha de transmissão ao nível de tensão em 230 kV é analisada diante da sua faixa de segurança em conjunto com os níveis de campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência.

Abstract

The present study is a brief historical survey aiming electromagnetic effects stemmed from a power transmission line. These electromagnetic effects, called electric field, magnetic field, surface potential gradient on the conductor, audible noise and radio interference, had their respective mathematical equations described. According to their mathematical equations, it was possible to obtain the lateral profile of magnetic field, electric field, audible noise and radio interference, all calculated through the software developed in the MATLAB® platform. The calculations of this work were validated. These electrical parameters and the safe range of a transmission line were analyzed all together. The calculation of the safe range was based on standard NBR 5422. The limits of electric and magnetic fields were based on The Normative Resolution ANEEL N° 398 of March, 23 2010. The limits of audible noise and radio interference were checked on Sub-Module 2.4, Minimum Requirements for Overhead Transmission Line ONS. Finally, an example of a transmission line to the voltage level of 230 kV was analyzed. The safety range was calculated. Levels of electric field, magnetic field, audible noise and radio interference were verified at the limit of the safe range of the transmission line.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	12
INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	14
CAPÍTULO 2.....	15
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
2.2 ANÁLISE GERAL DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS – BREVE HISTÓRICO.....	16
2.2.1 EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS MAGNÉTICOS E ELÉTRICOS	18
2.2.2 MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO	21
2.3 EFEITO CORONA – BREVE HISTÓRICO.....	22
2.4 RUÍDO AUDÍVEL – BREVE HISTÓRICO	26
2.5 NÍVEL DE RÁDIO INTERFERÊNCIA – BREVE HISTÓRICO.....	28
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
CAPÍTULO 3.....	31
NORMAS REGULAMENTADORAS E MÉTODO DE CÁLCULO DE CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO	31
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	31
3.2 NORMAS REGULAMENTADORAS PARA A EXPOSIÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS	31
3.3 MÉTODO DE CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO	34
3.4 MÉTODO DE CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO.....	37
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
CAPÍTULO 4.....	42
DESCRIÇÃO E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS EFEITOS CORONA, RUÍDO AUDÍVEL E RADIO INTERFERÊNCIA	42
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	42
4.2 EFEITO CORONA	42
4.2.1 EFEITO CORONA – FORMAÇÃO	44
4.2.2 EFEITO CORONA – CÁLCULO DE PERDAS.....	46
4.2.3 EFEITO CORONA – CÁLCULO DO GRADIENTE DE POTENCIAL	47
4.3 RUÍDO AUDÍVEL.....	51
4.3.1 RUÍDO AUDÍVEL – MÉTODO DE CÁLCULO	52
4.3.2 VALORES LIMITES PARA RUÍDO AUDÍVEL.....	55
4.4 RÁDIO INTERFERÊNCIA	56
4.4.1 MÉTODO DE CÁLCULO – MÉTODO COMPARATIVO	57
4.4.2 MÉTODO DE CÁLCULO – MÉTODO ANALÍTICO	59
4.4.3 VALORES LIMITES DO NÍVEL DE RÁDIO INTERFERÊNCIA	64
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
CAPÍTULO 5.....	66
VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO E ANÁLISE DA FAIXA DE SEGURANÇA DA LT	66

5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	66
5.2	FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DE CAMPO ELÉTRICO	66
5.3	VALIDAÇÃO – MÉTODO DE CÁLCULO DE CAMPO ELÉTRICO	67
5.4	FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO	69
5.5	VALIDAÇÃO – MÉTODO DE CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO	69
5.6	FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DO GRADIENTE DE POTENCIAL	71
5.7	VALIDAÇÃO – MÉTODO DE CÁLCULO DO GRADIENTE DE POTENCIAL	72
5.8	FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DE RUÍDO AUDÍVEL	73
5.9	VALIDAÇÃO – MÉTODO DE CÁLCULO DE RUÍDO AUDÍVEL	73
5.10	FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DE RÁDIO INTERFERÊNCIA	74
5.11	VALIDAÇÃO – MÉTODO DE CÁLCULO DE RÁDIO INTERFERÊNCIA	74
5.12	ANÁLISE DA FAIXA DE SEGURANÇA DA LINHA DE TRANSMISSÃO	75
5.13	ESTUDO DE CASO – LARGURA FAIXA DE SEGURANÇA LT	83
5.14	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
CAPÍTULO 6.....		89
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....		89
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	89
6.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		92

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - LINHA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICA DISPOSTA HORIZONTALMENTE COM O RESPECTIVO CAMPO ELÉTRICO DO CONDUTOR C EM UM PONTO "N"	35
FIGURA 2 - LINHA DE TRANSMISSÃO PERCORRIDA POR UMA CORRENTE "I" EM UM PONTO "I" E O SEU RESPECTIVO CAMPO MAGNÉTICO NO PONTO "J"	38
FIGURA 3 - CAMPO MAGNÉTICO EM UM PONTO "P" DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICA	40
FIGURA 4 - DOIS CONDUTORES SOBRE O SOLO E SUAS RESPECTIVAS IMAGENS.....	49
FIGURA 5 - NÍVEL DE RI ADICIONADO EM RELAÇÃO À DENSIDADE RELATIVA (ΔR)	63
FIGURA 6 - NÍVEL DE RI ADICIONADO EM RELAÇÃO À CONDUTIVIDADE DO SOLO	63
FIGURA 7 - NÍVEL DE RI ADICIONADO EM RELAÇÃO À FREQUÊNCIA.....	64
FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DE CAMPO ELÉTRICO	66
FIGURA 9 - PERFIL LATERAL DO CAMPO ELÉTRICO.....	67
FIGURA 10 – CÁLCULO DO PERFIL LATERAL DE CAMPO ELÉTRICO.....	68
FIGURA 11 – GRÁFICO 3D CAMPO ELÉTRICO AO NÍVEL DO SOLO	68
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO	69
FIGURA 13 - PERFIL LATERAL DO CAMPO MAGNÉTICO CALCULADO	70
FIGURA 14 - PERFIL LATERAL DO CAMPO MAGNÉTICO	70
FIGURA 15 - GRÁFICO 3D CAMPO MAGNÉTICO A 1 M DO NÍVEL DO SOLO	71
FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DO GRADIENTE DE POTENCIAL	71
FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DO RUÍDO AUDÍVEL	73
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DE RÁDIO INTERFERÊNCIA	74
FIGURA 19 - DISTÂNCIAS ENVOLVIDAS PARA O CÁLCULO DA LARGURA FAIXA DE SEGURANÇA	77
FIGURA 20 - PARÂMETRO PARA DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE BALANÇO	78
FIGURA 21 - VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO.....	79
FIGURA 22 - CORREÇÃO DO PERÍODO DE INTEGRAÇÃO	80
FIGURA 23 - PARÂMETRO \hat{A} DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE GUMBEL	82
FIGURA 24 PARÂMETRO \hat{B} DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE GUMBEL.....	82
FIGURA 25 - PERFIL LATERAL DE CAMPO ELÉTRICO DO CASO BASE.....	84
FIGURA 26- PERFIL LATERAL DO CAMPO MAGNÉTICO DO CASO BASE	85
FIGURA 27- VALORES DE RÁDIO INTERFERÊNCIA PARA UM PERFIL LATERAL DA LT (FAIR L50)	86
FIGURA 28- VALORES DE RUÍDO AUDÍVEL PARA CONDIÇÃO CONDUTOR MOLHADO (L50)	87

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – FAIXAS DE FREQUÊNCIAS	31
TABELA 2 – RESTRIÇÕES BÁSICAS PARA EXPOSIÇÃO DE SERES HUMANOS A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS VARIÁVEIS AO LONGO DO TEMPO, SENDO OS VALORES EM RMS E F A FREQUÊNCIA EM HZ.....	32
TABELA 3 - NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL A CAMPO ELETROMAGNÉTICOS VARIÁVEIS AO LONGO DO TEMPO (VALORES RMS DE CAMPO NÃO PERTURBADO), SENDO F A FREQUÊNCIA EM HZ.....	33
TABELA 4 - NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA EXPOSIÇÃO DO PÚBLICO EM GERAL A CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS VARIÁVEIS AO LONGO DO TEMPO (VALORES RMS DE CAMPO NÃO PERTURBADO), SENDO F A FREQUÊNCIA EM HZ	33
TABELA 5 - NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS NA FREQUÊNCIA DE 60 [Hz].....	33
TABELA 6 – FATORES DE SUPERFÍCIE	46
TABELA 7 - DADOS DA LT PARA CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO	67
TABELA 8 - DADOS DA LT PARA CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO	69
TABELA 9 - DADOS DA LT PARA CÁLCULO DO GRADIENTE DE POTENCIAL SUPERFÍCIE DO CONDUTOR.....	72
TABELA 10 - VALIDAÇÃO DO CÁLCULO DE GRADIENTE DE POTENCIAL NA SUPERFÍCIE DO CONDUTOR.....	72
TABELA 11 - DADOS DA LT PARA CÁLCULO DO RUÍDO AUDÍVEL (L_{50})	73
TABELA 12 - VALIDAÇÃO DOS VALORES DE RUÍDO AUDÍVEL.....	74
TABELA 13 – CONFIGURAÇÃO DA LT.....	75
TABELA 14 - VALIDAÇÃO DO CÁLCULO DE RÁDIO INTERFERÊNCIA (L_5).....	75
TABELA 15 - COEFICIENTES DE ACORDO COM A CATEGORIA DO TERRENO.....	80
TABELA 16 - VALORES DE N PARA CORREÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DA ALTURA	81
TABELA 17 - CONFIGURAÇÃO LT CASO BASE	83

ABREVIações

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
AC	Corrente Alternada
AT	Alta Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques</i>
DC	Corrente Contínua
EAT	Extra Alta-Tensão
EMTP	<i>Electromagnetic Transient Program</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
ICNIRC	<i>International Comission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INIRC	<i>International Non-Ionizing Radiation Comitee</i>
IRPA	<i>International Radiation Protection Association</i>
LT	Linhas de Transmissão
NBR	Normas Brasileira Regulamentadora
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONS	Operador Nacional de Energia Elétrica
RA	Ruído Audível
RI	Rádio Interferência
RMS	<i>Root Mean Square</i>
UAT	Ultra Alta-Tensão

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações iniciais

Historicamente, tem-se o registro da primeira linha de transmissão no Brasil por volta do ano de 1883, na cidade de Diamantina em Minas Gerais. Esta linha tinha uma extensão com aproximadamente 2 [km]. A população brasileira nesta época era estimada em pouco mais de 14 milhões de habitantes.

Muita coisa mudou após 130 anos da construção da primeira linha de transmissão a entrar em operação no Brasil. Hoje, a população é estimada em mais de 200 milhões de habitantes. Junto com este crescimento, vem acompanhado o crescente consumo de energia elétrica no país.

Com a necessidade de transportar grandes blocos de energia dos centros geradores aos centros consumidores para atender a crescente demanda, as linhas de transmissão estão sendo projetadas cada vez mais com um alto nível de tensão.

Entretanto, com aumento progressivo do nível de tensão das linhas de transmissão, tem-se, conseqüentemente, a preocupação com os efeitos eletromagnéticos produzidos por estas LTs. Os efeitos dos campos elétricos e magnéticos, bem como o surgimento do efeito corona e suas conseqüências (ruído audível e rádio interferência), tem sido objeto de estudos cada vez mais rigorosos por conta das exigências ambientais.

Em 23 de março de 2010, através da Resolução Normativa N° 398 da ANEEL (ANEEL, 2010), a Lei N°11.934 regulamentou os limites de exposição humana a campos elétricos e magnéticos. Para o ruído audível e rádio interferência, o submódulo 2.4, Requisitos Mínimos para Linhas Aéreas de Transmissão nos Procedimentos de Redes do ONS (ONS, 2000), limita os seus respectivos valores permitidos provenientes das linhas de transmissão de energia.

Diante das normas restritivas de valores eletromagnéticos provenientes das linhas aéreas de transmissão, os projetistas devem estar atentos a estas intensidades no limite da faixa de segurança de uma LT.

A faixa de segurança de uma LT é caracterizada como um local com restrições, com limitações à implementação de uso e ocupação que configurem em violação dos padrões de segurança estabelecido em norma. A faixa de segurança pode ser chamada de domínio ou servidão. A faixa de domínio caracteriza-se pela aquisição, por parte da concessionária ou proprietário da linha, da área de terra ocupada pela faixa de segurança da LT. A faixa de servidão caracteriza-se pela não aquisição da área de terra por parte da concessionária ou proprietário da LT. No entanto, o proprietário da faixa de terra ocupada pela faixa de servidão possui restrições de uso.

A Norma NBR 5422 fixa as condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, incluindo a largura da faixa de segurança de uma LT, levando-se em conta o balanço dos cabos devidos à ação do vento (NBR 5422, 1985).

Calculada a faixa de segurança de uma linha de transmissão de energia, resta saber se esta faixa possui valores permitidos em relação aos parâmetros eletromagnéticos emitidos pela LT. As intensidades de campos elétricos e magnéticos, bem como os níveis de ruído audível e rádio interferência devem estar com os seus valores no limite da faixa de segurança de acordo com as normas citadas anteriormente.

Portanto, este trabalho objetiva servir como um tutorial para os projetistas de linhas de transmissão no cálculo das intensidades de campos elétricos e campos magnéticos, bem como determinar os níveis do gradiente de potencial na superfície do condutor, ruído audível, rádio interferência e largura da faixa de segurança da LT. Consequentemente, avaliar se os valores eletromagnéticos estão de acordo com as normas vigentes do setor elétrico no limite máximo da faixa de segurança calculada.

Na grande maioria das referências bibliográficas identificadas no levantamento do estado-da-arte, os fenômenos elétricos citados, ou seja, campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência, são analisados separadamente. Desta forma, este trabalho reúne estes efeitos eletromagnéticos e analisa-os em conjunto a

fim de obter uma melhor eficiência dos resultados desejados no projeto de uma linha aérea de transmissão em corrente alternada.

1.2 Estruturação do Trabalho

O trabalho é desenvolvido em 6 capítulos, conforme são descritos abaixo.

O capítulo 2, em sequência, apresenta uma revisão bibliográfica acerca dos campos elétricos e magnéticos, efeito corona e níveis de ruído e rádio interferência.

O capítulo 3 analisa os métodos de cálculo de campo elétrico e magnético. Todos os procedimentos necessários para o cálculo do perfil lateral de campo magnético e elétrico são expostos. Adicionalmente, as correspondentes normas vigentes são apresentadas.

O capítulo 4 faz a descrição de todas as denominações e equações necessárias para o cálculo do gradiente de potencial na superfície do condutor, nível de ruído audível e rádio interferência provenientes de uma LT. Os valores limites de ruído audível e rádio interferência são analisados de acordo com suas respectivas normas.

O capítulo 5 expõe a validação dos cálculos desenvolvidos na plataforma MATLAB®. Posteriormente, insere-se o cálculo da faixa de segurança de uma LT e são analisados no limite da faixa de segurança os valores de campos elétrico e magnético, ruído audível e rádio interferência de um caso base.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta algumas conclusões e propostas de desenvolvimentos de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações iniciais

Com um vasto material na literatura abordando diferentes aspectos acerca de campos elétrico e magnético, efeito corona, ruído audível e radiointerferência; torna-se oportuno realizar a seguinte revisão bibliográfica.

O estudo bibliográfico de campo elétrico e magnético é conduzido em função de três vertentes, dado por:

- Revisão bibliográfica geral de campos elétricos e magnéticos. Avaliação de valores medidos e calculados; medidores de campos e procedimentos de medidas; provimento de possíveis contribuições para diminuição ou aumento dos campos, entre outros.
- Possível relação entre campos elétricos e magnéticos com os efeitos biológicos em seres humanos. Normas internacionais e regulamentação nacional.
- Métodos empregados para o cálculo de campo elétrico e magnético.

Adicionalmente, realiza-se um breve histórico sobre efeito corona e suas consequências (ruído audível e rádio interferência). São trabalhos que podem contribuir para as metodologias de cálculo de tais fenômenos. Outros temas que não foram contemplados neste estudo, como a inserção do efeito corona no cálculo dos transi-tórios eletromagnéticos, é igualmente abordado como forma de acompanhar cronologicamente as pesquisas dos respectivos assuntos.

2.2 Análise Geral de Campos Elétricos e Magnéticos – Breve Histórico

Na década de 70, com a crescente implementação de linhas de AT e EAT surge, simultaneamente, a necessidade de avaliação dos efeitos causados por estas linhas. Assim, vários estudos, como cálculo e medições de campo elétrico e magnético, bem como correntes e tensões induzidas em objetos e pessoas têm sido detalhadamente investigados.

No trabalho de (DENO, 1976) são analisados os campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão de energia. O perfil lateral dos campos ao nível do solo são calculados e medidos, confrontando-os.

No ano de 1978, um grupo de trabalho publica a referência (LAMBERT e CHAIRMAN, 1978). O artigo contém especificações acerca dos medidores de campo elétrico e magnético, bem como os seus procedimentos de medidas.

Também em 1978, um relatório final preparado pelo EPRI é publicado. O estudo mostra o resultado de pesquisas de campo elétrico e magnético de linhas de alta tensão, abordando as definições e cálculos dos campos (EPRI, 1978).

A segunda edição do livro “Transmission Line Reference Book – 345 kV and above” é publicada em 1982. Com 13 capítulos, o livro aborda diferentes assuntos sobre linhas de transmissão. No capítulo 8, com o título de “Fields Effects of Overhead Transmission Lines and Stations”, as definições, cálculo e medidas de campo elétrico e magnético são textualmente registradas (EPRI, 1982).

O artigo de (JACOBS e DIETRICH, 1984), constata-se que na presença de casas, cercas, árvores e outros objetos próximos à linha de transmissão, o valor do campo elétrico é reduzido. Assim, o cálculo do campo elétrico faz a consideração sem a presença destes objetos, providenciando uma estimativa superior do campo atual presente.

Preocupados especificamente com o campo magnético devido às linhas de transmissão ser potencialmente as fontes causadoras do câncer infantil, a publicação de (NEELAKANTA e UNGVICHIAN, 1989) investiga o nível de campo magnético para duas situações: linhas de transmissão aéreas e linhas de transmissão subterrâneas.

Para linhas subterrâneas comprova-se a minimização dos seus valores de campo magnético em relação a linhas aéreas.

No ano de 1990, um programa computacional é implementado usando o Hardware IBM PC-XT. O programa apresenta uma revisão dos cálculos do campo magnético associado às linhas de transmissão, permitindo verificar os seus respectivos perfis laterais (IYYUNI e SEBO, 1990).

No trabalho de (OLSEN, 1993), mostra-se o cálculo do campo magnético com base em um tratamento estatístico devido a grande variação do valor eficaz (RMS) da corrente em uma linha de transmissão.

A norma “Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines” é publicada. A norma é uma revisão das edições de 1979 e 1987, definindo características, procedimentos e calibrações dos medidores de campo elétrico e magnético (ANSI/IEEE, 1994).

A publicação de (MAMISHEV, NEVELS e RUSSEL, 1996), considera-se o efeito da catenária no cálculo do campo magnético. Quanto maior a catenária, maior é o valor do campo medido.

No artigo (LIU, RUAN, et al., 2002) são analisados os cálculos de campos elétricos e magnéticos com a presença de cabos para-raios em linhas de alta tensão. Conclui-se que os seus respectivos valores não sofrem modificações. Já para linhas de distribuição, o condutor neutro tem uma forte influência na magnitude desses campos. Para correntes desequilibradas, uma nova fórmula de cálculo de campo magnético é desenvolvida. Também é mostrado que os valores de campo elétrico são sensíveis perto de estruturas metálicas e o campo magnético não é fortemente suprimido pela presença destas estruturas.

Um estudo de caso de campo magnético e elétrico de uma linha aérea de alta tensão é analisado em (FILHO, 2004). O modelo é baseado no método de simulação de cargas para o cálculo do campo elétrico e Lei de Biot-Savart para o cálculo de campo magnético. A validação dos resultados é feita por medir e calcular os valores para o perfil lateral.

Em 2005, é lançada a terceira edição do livro “Transmission Line Reference Book – 200 kV and above”. Agora com 15 capítulos, o livro atualiza informações sobre os diferentes assuntos relacionados a linhas de transmissão. No capítulo 7, com o título de “Electric and Magnetic Fields”, tem-se definições, cálculo e medidas de campo elétrico e magnético, bem como a discussão dos seus efeitos (EPRI, 2005).

No trabalho de (SANTOS, HENRIQUE, et al., 2011), mostra-se a capacidade da ferramenta computacional, na plataforma MATLAB®, em calcular o campo elétrico e magnético de linhas de transmissão, tanto em gráficos 2D como em gráficos 3D.

A tendência cada vez maior do uso de linhas de transmissão para transportar grandes blocos de energia face ao distanciamento das fontes produtoras e os centros de carga, a necessidade de se analisar a intensidade de campos magnético e elétrico das linhas de extra-alta tensão, faz-se inadiável. Em (ZHAO, LU e WU, 2012), abordam-se os cálculos de campos para uma linha de 1000 kV em corrente alternada. Já no artigo de (UNDE e KUSHARE, 2013), faz-se uma rigorosa análise de campo elétrico e magnético para linha de circuito duplo e simples para uma tensão de 1200 kV em AC.

2.2.1 Exposição Humana a Campos Magnéticos e Elétricos

As buscas nas precisões de cálculo de campos elétricos e magnéticos são devidas a seguinte preocupação principal: os valores destes campos podem vir a causar alguma anomalia a humanos ou animais? Não existe um consenso na solução deste problema ou algum estudo que comprove que os efeitos dos campos elétricos e magnéticos possam causar algum dano à saúde do homem ou animais. A seguir, faz-se a chamada de algumas citações bibliográficas, entre inúmeras outras pesquisas já realizadas sobre campos magnéticos e elétricos gerados por linhas de AT, EAT e UAT.

Ressalta-se que a preocupação sobre os efeitos dos campos elétricos e magnéticos é antiga. A publicação de (ATOIAN, 1978), aborda-se o assunto tratando de nenhuma evidência conclusiva de que campos elétricos e magnéticos de linha de extra-alta tensão possa causar algum dano biológico a animais ou pessoas.

Um dos primeiros trabalhos publicados sugerindo uma associação entre exposição a campos magnéticos e câncer infantil é fruto da investigação de Wertheimer and Leeper em 1979. O estudo citava que crianças que moravam no mesmo endereço, por um período considerável de tempo, perto de um alto fluxo de corrente elétrica, desenvolveram um número maior de casos de câncer comparada com outras crianças do grupo de controle. No entanto, a correlação é incerta, pois os danos devidos podem ser creditados a outros tipos de problemas (WERTHEIMER e LEEPER, 1979).

Mais adiante, a pesquisa de (MICHAELIS, SCHÜZ e MEINERT, 1997), fez-se alguma analogia entre a exposição do campo magnético e o aumento de casos de leucemia infantil. Entretanto, admitem que os resultados sejam inconsistentes e não podem confirmar uma associação estatística deste fato.

No ano de 2000, a referência (AHLBOM, DAY e FEYCHTING, 2000), não descobre nenhuma evidência do aumento do risco de leucemia infantil para residência expostas ao nível de campo magnético abaixo de 0,4 μ T. Porém, para valores acima deste, alertam para um significativo risco no aumento da leucemia infantil.

Em 2002, a IARC publicou um relatório avaliando os campos magnéticos como possível causador de câncer para humanos. Uma classificação baseada em estudos epidemiológicos demonstra um índice maior para leucemia infantil para uma exposição média residencial a campos magnéticos acima de 0,3 a 0,4 μ T. Mesmo assim, a evidência relacionada com leucemia infantil não é suficientemente conclusiva para ser considerada causal (IARC, 2002).

O artigo de (CRASSON, 2003), volta afirmar que não há conhecimento necessário que possa imputar aos campos elétricos e magnéticos a origem causal de danos à saúde.

Já no ano de 2008, relaciona-se a possibilidade de uma associação entre exposição de campos elétricos e magnéticos gerados na frequência de 50 e 60 Hz com a doença de Alzheimer em (GARCÍA, SISTERNAS e HOYOS, 2008). Entretanto, mais uma vez, existe uma falta de resultados conclusivos que permitam comprovar tal fato.

No entanto, normas internacionais quanto à exposição aos efeitos dos campos eletromagnéticos foram desenvolvidas para proteger o público e trabalhadores contra

os possíveis danos. As normas estabelecem limites máximos à exposição de trabalhadores e público em geral.

Em 1974, a IRPA formou um grupo de trabalho para examinar os problemas surgidos de vários tipos de radiações não ionizantes.

Já no ano de 1977, no congresso da IRPA em Paris, a partir deste grupo de trabalho formou-se a INIRC.

Durante o Oitavo Congresso Internacional da IRPA, no mês de maio de 1992, é criada a Organização Científica Internacional Independente. Esta organização, com a sigla de ICNIRP, teve a função de substituir a INIRC e a missão de investigar os perigos que podem ser associados com as diferentes formas de radiações não ionizantes bem como desenvolver diretrizes sobre limites de exposição a estas radiações e conseqüentemente, tratá-la com todos os aspectos de proteção.

A ICNIRP fez uma revisão de seus estudos e publicou, em 1998, o “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields”, na faixa de até 300 GHz (ICNIRC, 1998).

Nos estudos de (DIMBYLOW, 2005) e (DIMBYLOW, 2006), torna-se possível calcular através de modelagem matemática, os níveis de referência imposta pela ICNIRP a partir de restrições básicas de campo elétrico interno ao qual cada parte do corpo pode ser submetida. Os valores são calculados para o estado de acoplamento máximo do campo para o qual o indivíduo está sendo exposto, proporcionando assim uma proteção máxima.

Em 2010, a ICNIRP 1998 é revisada. Abrangendo uma faixa de frequência de 1 [Hz] até 100 [kHz], denominada de “ Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1Hz-100kHz)” (ICNIRC, 2010).

No Brasil, a NBR 15415 de 30 de novembro de 2006, estabelece a regulação necessária para a exposição do público geral ao campo elétrico e magnético (NBR 15415, 2006).

A Lei Federal nº 11934, de 5 de maio de 2009, regulariza a exposição do público em geral e da população ocupacional.

A Resolução Normativa 398 da ANEEL, de 23 de março de 2010, regulamenta a Lei nº 11934, ao qual se refere aos limites de exposição humana aos campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2010).

Nos capítulos subsequentes é dada uma ênfase maior sobre estas normas que regulamentam tal exposição a campos elétricos e magnéticos.

2.2.2 Métodos de Cálculo de Campo Elétrico e Magnético

Existem diversos métodos de cálculos aplicados à simulação do campo elétrico. Cada método possui sua vantagem e desvantagem em algum ou outro ponto específico. São citados alguns métodos de cálculos existentes na literatura, tais como:

- Método de Simulação de Cargas
- Método dos Elementos Finitos
- Método dos Elementos de Contorno
- Método dos Momentos
- Método das Imagens
- Método de Monte Carlo

O cálculo do campo elétrico é efetuado a partir do conhecimento das cargas elétricas em cada uma das fases da linha. Portanto, na realização deste trabalho, considera-se o Método de Simulação de Cargas para a obtenção das cargas ao longo das linhas de AT, EAT e UAT. Esta escolha justifica-se pela possibilidade dos condutores serem incorporados no algoritmo proposto pelo método. Além disso, possui um esforço computacional bem menor quando comparado, por exemplo, com o método dos elementos finitos. No que diz respeito em termos de precisão, os dois métodos se equivalem. O desenvolvimento deste método de cálculo é realizado no próximo capítulo.

Um método de cálculo do campo eletrostático através de simulação de cargas é proposto na referência (SINGER, STEINBIGLER e WEISS, 1974). A base deste cál-

culo é a substituição da distribuição de cargas na superfície de um condutor por um elemento fictício de cargas situado fora da área de simulação do campo elétrico. O método se baseia em uma solução particular das equações de Laplace e Poisson denominado de Método de Simulação de Cargas.

No trabalho de (MALIK, 1989), propõe-se uma revisão do método de cálculo de simulação de cargas examinando criticamente os diferentes aspectos deste método e identificando seus potenciais de uso e limitações.

Para o cálculo do campo magnético é utilizada a Lei de Biot-Savart aplicada a um condutor finito no espaço.

Recentemente, ainda, pode-se ver uma significativa utilização do método de simulação de cargas para o cálculo do campo elétrico e a Lei de Biot-Savart para o cálculo do campo magnético ao nível do solo para linhas de transmissão de AT, EAT e UAT.

O Método de Simulação de Cargas para o cálculo do campo elétrico e a Lei de Biot-Savart para o cálculo do campo magnético são usados em (SARMENTO, 2012). Neste trabalho, diferentes tipos de linhas de transmissão têm os seus campos elétricos e magnéticos analisados.

2.3 Efeito Corona – Breve Histórico

Trabalhando em laboratórios em 1910 a 1930, Peek verificou experimentalmente que o fenômeno das descargas de corona se inicia com valores de gradientes mais elevados nas superfícies dos condutores quando simultaneamente se iniciam as manifestações luminosas. A esse valor de gradiente denomina-se gradiente crítico visual. Peek formulou uma equação para o cálculo do gradiente crítico visual da linha de transmissão de energia elétrica. Miller, em 1956/57, então contando com mais recursos tecnológicos do que Peek consegue aperfeiçoar a equação proposta por Peek (FUCHS, 1977).

Em 1914, Townsend apresentou estudos sobre o processo de ionização dos gases, abordando os diversos mecanismos envolvidos na formação e propagação de descargas elétricas em gases. Townsend, em seus primeiros experimentos de descarga de gás, descreveu o significado do número de coeficientes de elétrons produzidos

por um simples elétron viajando a distância de 1 [cm] em um campo uniforme. O coeficiente é conhecido como primeiro coeficiente de ionização de Townsend. A corrente de descarga no processo de avalanche é (TOWNSEND, 1914):

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha d} \quad (2.1)$$

Sendo:

α - primeiro coeficiente de ionização de Townsend

d – distância

No ano de 1954, tem-se a constatação de que o efeito corona pode atenuar e distorcer as ondas viajantes em linhas de transmissão. A atenuação e distorção são maiores para a polaridade positiva do que negativa (WAGNER, GROSS e LLOYD, 1954).

Desde 1960, as características de perda por corona de uma variedade de LT em AT e EAT é estudada. Em (ANDERSON, BARETSKY e MACCARTHY, 1996), os autores analisam as perdas corona sobre todas as condições de tempo para linhas de por efeito corona.

Já no trabalho de (JUETTE e ZAFFANELLA, 1970), são feitas as análise das consequências no surgimento do efeito corona, tais como: rádio interferência, ruído audível e perdas por corona. As consequências do efeito corona são analisadas na condição de chuva e os diâmetros dos condutores e os números de subcondutores presentes nos feixes são modificados, comprovando a dependência destes fatores no aparecimento de rádio interferência, ruído audível e perdas por corona.

Do ponto de vista do projeto de LT, o fator que tem maior influência no efeito corona é o gradiente de superfície do condutor. Assim, torna-se extremamente necessário o conhecimento preciso de um método de cálculo que possa estimar o efeito corona para uma linha proposta. Portanto, a referência (IEEE COMMITTEE REPORT, 1979), traz uma comparação dos métodos de cálculo do gradiente de potencial na superfície dos condutores. Os métodos comparados são os métodos de imagens sucessivas, método das imagens, simulação de carga, método modificado de Markt e Mengele e método da equação integral.

No Brasil, em 1977, o livro “Transmissão de Energia Elétrica”, traz no capítulo 10 dentre 11, uma descrição acerca do efeito corona (FUCHS, 1977). Neste capítulo

descreve-se o Método de Potencial de Maxwell. Um método totalmente aceitável, pois traz resultados que diferem em menos de 1% do método de Sarma e Janischewsky, considerado aquele que se baseia nas considerações teóricas mais corretas e completas.

A segunda edição do livro “Transmission Line Reference Book – 345 kV and above, lançada em 1982, traz no capítulo 4 a descrição do efeito corona em linhas de transmissão AC. Também no capítulo 7 é analisado a perdas por corona nas diversas condições de tempo (EPRI, 1982).

Para o cálculo dos transitórios eletromagnéticos na presença do efeito corona, adotam-se modelos para a simulação do efeito. Uma das primeiras propostas para inclusão do efeito corona está registrada em (MCCANN, 1943). O modelo define um raio efetivo maior para o condutor sob corona.

Citando outro exemplo na literatura, dentre os vários existentes para o cálculo dos transitórios eletromagnéticos na presença do efeito corona, pode-se considerar o trabalho registrado em (GARY, DRAGAN e CRITESCU, 1978). O estudo define uma equação para representar uma capacitância variável na presença do efeito corona.

Em 1991, o trabalho de (CARNEIRO e JOSE, 1991) faz uma avaliação comparativa do grande número de modelos de corona disponível em termos da sua exatidão e adequação para a interface com o EMTP.

No ano 2003, na “International Conference on Power System Transients” realizada nos Estados Unidos, Mamis apresenta o artigo “State Space Transient Analysis of Single Phase Transmission Lines with Corona”. O trabalho apresenta as equações de Skilling and Umoto e Gary que representam o efeito corona e as comparam. Conclui-se que o método de Skilling and Umoto é mais satisfatório que o método de Gary (MAMIS, 2003).

Prosseguindo, no ano de 1995, em pesquisas de (ABDEL-SALAM e ABO-SHAL, 1995), investiga-se o efeito de um revestimento na superfície do condutor para aumentar a tensão de início de corona. O artigo conclui que o revestimento suprime o gradiente de potencial na superfície do condutor em comparação com o condutor não revestido.

Com vários problemas registrados pelo efeito corona, os estudos publicados em (YOUSSEF, 2001), anunciam uma utilidade do efeito corona para o operador da linha de transmissão. O trabalho usa o efeito corona para determinar a tensão em certos pontos da LT. O sistema baseado no efeito corona providencia solução para alguns problemas encontrados sendo mais barato que outros métodos.

No ano de 2005, é lançada a terceira edição do livro “Transmission Line Reference Book – 200 kV and above”. Com 15 capítulos, o livro atualiza informações sobre os diferentes assuntos relacionados a linhas de transmissão. No capítulo 8, com o título de “Corona and Gap, Discharge Phenomena”, tem-se a descrição do efeito corona. No capítulo 11, com o título de “Corona Loss and Ozone”, tem-se informações sobre perdas corona (EPRI, 2005).

Para perdas corona, a referência (YUNPENG, SHAOHUA, et al., 2009) faz uma análise detalhada do problema. As perdas corona são descritas como dependente da estrutura da linha, do diâmetro do feixe de condutores, distância fase-fase, distância fase-terra, o campo elétrico máximo na superfície do condutor e as condições de tempo. Para as condições climáticas, o artigo mostra graficamente o quanto a chuva tem uma influência significativa nas perdas corona da linha.

Recentemente, no ano de 2012, o artigo (LI, SHUTTLEWORTH, et al., 2012) faz uma revisão sobre os diferentes métodos de cálculo de gradiente de potencial na superfície do condutor. Com o rápido aumento do nível de tensão nos modernos sistemas de potência, o fenômeno do efeito corona e suas consequências tornam-se elementos críticos nas considerações de projetos das linhas aéreas de transmissão. Portanto os métodos de cálculos dos Coeficientes de Potencial de Maxwell, Markt e Mengele, Sucessivas Imagens e Simulação de cargas são analisados e comparados.

Posteriormente, no ano de 2013, os vários métodos desenvolvidos nos últimos anos para minimizar o efeito corona são discutidos em (NOURIRAD, GOMES e KADIR, 2013). O artigo mostra várias técnicas para reduzir as perdas corona como o aumento do raio do feixe de condutores para diminuir o campo elétrico na superfície do condutor. Também, afirma que as perdas corona aumentam com o aumento da frequência. Tal constatação indica que as perdas são mais altas para o caso de linhas de transmissão AC em comparação as linhas de transmissão DC.

2.4 Ruído Audível – Breve Histórico

Com testes em laboratório, o relato descrito em (TAYLOR, CHARTIER e RICE, 1969), pode ser considerado como sendo o primeiro trabalho no desenvolvimento necessário para estimar ruído audível em LT. A pesquisa é direcionada sobre os efeitos do tamanho e do número de subcondutores no feixe que possam contribuir para o aparecimento do ruído audível.

Logo em sequência, no ano de 1970, o ruído audível é definido como a pressão do som em torno de um cabo da linha. A potência acústica é a soma de cada condutor ou fonte. Assim, é analisado o nível da pressão do som para diferentes feixes testados sobre chuva sendo proporcional à função de excitação e conseqüentemente do efeito corona (JUETTE e ZAFFANELLA, 1970).

As pesquisas em (SFORZINI, CORTINA, et al., 1975) investigam qualitativamente e quantitativamente as características de ruído audível causado por corona AC nos condutores. Os Condutores de diferentes tipos e tamanho foram testados sobre condições de clima seco e úmido, sob uma ampla faixa de gradiente de tensão. Conclusões são obtidas como o ruído relatado com a variação do gradiente de tensão, diâmetro do condutor e o número de subcondutores por fase. A fórmula de variação do nível de som é apresentada em função do gradiente de potencial, diâmetro do condutor e número de subcondutores por fase.

Sabendo-se da relação do efeito corona com o ruído audível e os seus valores dependentes do diâmetro dos condutores e número de subcondutores presentes no feixe, em (COMBER e CORTINA, 1976), descreve-se uma forma diferente de redução do nível de ruído audível de uma LT com a introdução de uma assimetria no posicionamento dos subcondutores dispostos dentro dos feixes. No entanto, este benefício é muito dependente do gradiente de superfície a qual os feixes dos condutores estão operando.

Um método é proposto para avaliar o efeito do ruído audível causado por linhas de transmissão em residências próximas à LT. O procedimento empírico desenvolvido por L.N. Miller prevê o nível de ruído audível na base dos vários parâmetros que influenciam significativamente o efeito corona (KEAST, 1980).

Como já apresentado, o livro “Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above/Second Edition” publicado em 1982, reúne todos os estudos da época sobre ruído audível. O livro discorre no capítulo 6 sobre características, medidas, efeito das condições de tempo, efeito da geometria da linha e condições de superfície do condutor; bem como o cálculo do nível de ruído em linhas de transmissão (EPRI, 1982).

Também em 1982, um relatório produzido por uma força tarefa, apresentou um total de 9 métodos para cálculo de ruído audível para linhas AC e 4 métodos para cálculo de linhas DC. O método de cálculo de ruído audível é dividido em 2 classes, sendo uma categoria para uma configuração particular e dada classe de tensão e outro sendo mais genérico, podendo ser aplicado a diferentes configurações geométricas. Observam-se poucas divergências entre os resultados dos métodos, apesar da diferenciação das fórmulas (IEEE COMMITTEE REPORT, 1982).

No ano de 1985, o IEEE lança a norma “IEEE Standard for the Measurements of Audible Noise from Overhead Transmission Lines”. A norma estabelece procedimento uniforme para medir o ruído audível proveniente das linhas de transmissão. Um procedimento uniforme é o pré-requisito necessário para avaliar e comparar o desempenho do ruído audível de várias linhas de transmissão de alta tensão (ANSI/IEEE, 1985).

Prosseguindo, já no ano de 1992, a norma “IEEE Standard for the Measurement of Audible Noise from Overhead Transmission Lines” é modificada e publicada com melhoramentos (ANSI/IEEE, 1992).

Nos estudos publicados no artigo (LIU e ZAFFANELLA, 1996), são apresentados os algoritmos para calcular o ruído audível de linhas de transmissão com condutores não paralelos. Os Gráficos de perfil lateral de ruído audível para condutores sob forte chuva ou condutor úmido são apresentados e discutidos. Nestes gráficos, evidencia-se a diferença de valores entre condutor úmido e condutor sob forte chuva.

A referência (TANABE, TAKEBE e ISOZAKI, 1996), dispõem-se de 8 casos de linhas de transmissão acima de 1000 kV com condutores variando entre disposições assimétricas, simétricas e redução de diâmetro. Os resultados obtidos mostram que a assimetria da disposição e a diminuição do raio dos condutores podem reduzir o nível de ruído.

No ano de 2000, são propostas 4 novas fórmulas para calcular o nível de ruído proveniente de linhas de transmissão AC. As fórmulas publicadas são comparadas com as existentes, tendo uma boa precisão no seu resultado final (YANG, LEE, et al., 2000).

O livro “Transmission Line Reference Book – 200 kV and above” publicado em 2005, sendo a terceira revisão, conta com 15 capítulos, atualizando informações sobre os diversos temas relacionados a LTs. No capítulo 10, com o título de “Audible Noise”, tem-se a descrição detalhada do ruído audível emitido por uma linha de transmissão (EPRI, 2005).

Recentemente, no ano de 2012, faz-se uma análise comparativa do uso de condutores novos com condutores velhos em (BIAN, CHEN, et al., 2012). Considerando um tempo de serviço de 12, 15 ou 20 anos para condutores velhos, tem-se que tanto em condições de tempo bom como para condições de mau tempo, o nível de ruído para condutores velhos são maiores em relação a novos condutores empregados em linhas de transmissão.

2.5 Nível de Rádio Interferência – Breve Histórico

Nos estudos de (ADAMS, 1956) apresenta-se um primeiro método de cálculo do nível de rádio interferência de uma linha de transmissão usando a análise modal. ADAMS considera a terra como um condutor perfeito com condutividade infinita.

Para uma melhor conceituação da análise modal usada por (ADAMS, 1956), no cálculo de RI para linhas aéreas de transmissão, o artigo publicado em 1965, analisa a técnica da análise modal aplicada a propagação de sinais em linhas aéreas de transmissão incluindo as correções de Carson para terra como condutor elétrico (HEDMAN, 1965).

No ano de 1972, faz-se uma análise detalhada acerca da função excitação (Γ_i) em (MOREAU e GARY, 1972). O artigo faz ainda uma avaliação matemática da função de excitação para o caso de chuva forte e preceitua como uma característica intrínseca do nível de ruído do condutor ou do feixe, como sendo independente da geometria da linha.

Nas pesquisas de (JUETTE, 1973), são identificadas duas classificações para as técnicas de cálculo de rádio interferência; método comparativo e método analítico. O trabalho apresenta 10 métodos de cálculo, sendo 8 métodos comparativos e 2 por métodos analíticos. Os resultados de cálculo dos métodos propostos são confrontados com os valores medidos para tempo bom e tempo com chuva.

O livro “Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above/Second Edition” publicado em 1982 traz no capítulo 5 todos os estudos da época sobre rádio interferência. Discussões como medidores e conceituação do nível de rádio interferência, bem como a influência das condições climáticas, geometria da linha e superfície dos condutores no valor do nível de rádio interferência, entre outros, são analisados. Também, os métodos de cálculo analítico e comparativo são descritos (EPRI, 1982).

A norma “IEEE Standard Procedures for the Measurements of Radio Noise from Overhead Power Lines and Substations”, publicada em 1986, define um procedimento uniforme da medida de radio interferência gerado por corona originário de linhas aéreas de transmissão. O procedimento uniforme é um pré-requisito para comparar ou validar o desempenho de rádio interferência de várias linhas de transmissão e sub-estação (IEEE, 1986).

O artigo (OLSEN, SCHENNUM e CHARTIER, 1992) apresenta 5 diferentes métodos para prever o nível de interferência para mau tempo provenientes das linhas de transmissão.

Os estudos publicados em (PHAIBOON, VIVEK e SOMKUARNPANIT, 2000), é apresentado um método que considera a radio interferência induzido por corona no sistema de transmissão composto por 2 tipos. O primeiro é o RI irradiado das típicas condições. O outro é relativo a mudança dos fatores ambientais, tais como densidade do ar, condutividade da terra e determinada frequência. O global RI é descrito pela soma dos valores dos 2 tipos de RI's.

Por fim, como já citado, O livro “Transmission Line Reference Book – 200 kV and above”, publicado em 2005, traz no capítulo 9, sobre o título de “Electromagnetic Interference”, os detalhes da rádio interferência provenientes das LTs em AT, EAT e UAT (EPRI, 2005).

2.6 Considerações Finais

A partir da década de 70, com a implementação crescente de linhas de AT e EAT, até os dias atuais incluindo linhas em UAT, os efeitos adversos provenientes das LTs estão sendo amplamente discutidos.

A revisão bibliográfica efetuada fornece condições necessárias para avaliar os diversos assuntos relacionados aos campos elétricos e magnéticos, bem como o efeito corona e os níveis de ruído audível e rádio interferência.

Assim, nos próximos capítulos, os efeitos eletromagnéticos são analisados e os seus respectivos métodos de cálculos são apresentados. Posteriormente, todos os métodos de cálculos são validados de acordo com as referências bibliográficas citadas neste capítulo.

Capítulo 3

Normas Regulamentadoras e Método de Cálculo de Campo Elétrico e Magnético

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são discutidas as normas vigentes sobre os campos elétricos e magnéticos. Os valores máximos para cada campo são expostos. Posteriormente, são desenvolvidas as equações matemáticas para o cálculo do campo elétrico e magnético.

3.2 Normas Regulamentadoras para a Exposição de Campos Elétricos e Magnéticos

Segundo o IEEE, os campos eletromagnéticos podem ser classificados em faixas de frequência conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 – Faixas de Frequências

Faixa de Frequência	Classificação
30 kHz a 300 kHz	Frequências baixas
3 kHz a 30 kHz	Frequências muito baixas
3 Hz a 3 kHz	Frequências extremamente baixas
Abaixo de 3 Hz	Frequências Ultra-Baixas

Fonte: (ICNIRC, 2010)

Para frequências industriais de 50 e 60 [Hz], utilizadas como padrão nos sistemas elétricos de potência, tem-se a denominação de frequências extremamente baixas, onde se encontra a frequência de interesse na avaliação da exposição a campos elétricos e magnéticos deste trabalho.

Os campos elétricos e magnéticos na faixa de frequência extremamente baixa possuem os comprimentos de ondas de 5000 [Km] para frequência de 60 [Hz]. Assim,

superam algumas ordens de grandeza às dimensões do corpo humano, permitindo que estes campos sejam aproximados como campos quase estáticos permitindo ser tratados separadamente.

Para frequências extremamente baixas, os vários estudos contidos na literatura, onde alguns foram citados neste trabalho, não consta nenhuma evidência direta entre os campos elétricos e magnéticos com os possíveis danos à saúde.

No entanto, através da reunião de vários estudos na área, a ICNIRP 2010 tem atualmente uma diretriz revisada estabelecendo restrições básicas de exposição aos campos elétricos e magnéticos, tanto para a população em geral como para os trabalhadores que atuam no sistema elétrico.

De acordo com a Norma 398, de 23 de Março de 2010 da ANEEL, Restrições Básicas podem ser definidas como os limites máximos de exposição humana a campos elétricos e magnéticos, baseados em efeitos reconhecidos à saúde, estabelecido pela ICNIRP e recomendados pela OMS de modo a garantir que essas grandezas físicas não ultrapassem os limiares de interação biofísica com tecidos vivos, de modo a não causar danos à saúde. A Tabela 2 mostra as restrições básicas para exposição dos seres humanos a campos elétricos e magnéticos.

Tabela 2 – Restrições Básicas para Exposição de Seres Humanos a Campos Elétricos e Magnéticos Variáveis ao Longo do Tempo, sendo os Valores em RMS e f a Frequência em Hz

Características da Exposição		Faixa de Frequência	Ei [V/m]
Exposição Ocupacional	Tecidos do SNC da Cabeça	1 Hz – 10 Hz	$0,5/f$
		10 Hz – 25 Hz	0,05
		25 Hz – 400 Hz	$2 \times 10^{-3} \times f$
		400 Hz – 3 kHz	0,8
	Todos os Tecidos da Cabeça e do corpo	3 kHz – 10 MHz	$2,7 \times 10^{-4} \times f$
		1 Hz – 10 Hz	0,8
Exposição do Público Em Geral	Tecidos do SNC da Cabeça	3 kHz – 10 MHz	$2,7 \times 10^{-4} \times f$
		1 Hz – 10 Hz	$0,1/f$
		10 Hz – 25 Hz	0,01
		25 Hz – 1000 Hz	$4 \times 10^{-4} \times f$
	Todos os Tecidos da Cabeça e do corpo	1000 Hz – 3 kHz	0,4
		3 kHz – 10 MHz	$1,35 \times 10^{-4} \times f$
		1 Hz – 3 kHz	0,4
		3 kHz – 10 MHz	$1,35 \times 10^{-4} \times f$

Fonte: (ICNIRP, 2010)

Os níveis de referência atuais são obtidos das restrições básicas por modelos matemáticos usando dados publicados por (DIMBYLOW, 2005) e (DIMBYLOW, 2006).

As Tabelas 3 e 4 apresentam os níveis de referência para a população ocupacional e público em geral, respectivamente, de acordo com (ICNIRC, 2010).

Tabela 3 - Níveis de Referência para Exposição Ocupacional a Campo Eletromagnéticos Variáveis ao Longo do Tempo (Valores RMS de Campo não Perturbado), sendo f a frequência em Hz.

Faixa de Frequências	Intensidade do Campo Elétrico E (kV/m)	Intensidade do Campo Magnético H (A/m)	Densidade do Fluxo Magnético B (T)
1 Hz – 8 Hz	20	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$0,2 / f^2$
8 Hz – 25 Hz	20	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^{-2} / f$
25 Hz – 300 Hz	$5 \times 10^2 / f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz – 3 kHz	$5 \times 10^2 / f$	$2,4 \times 10^5 / f$	$0,3 / f$
3 kHz – 10 MHz	$1,7 \times 10^{-1}$	80	1×10^{-4}

Fonte: (ICNIRC, 2010)

Tabela 4 - Níveis de Referência para Exposição do Público em Geral a Campos Eletromagnéticos Variáveis ao Longo do Tempo (Valores RMS de Campo não Perturbado), sendo f a frequência em Hz

Faixa de Frequências	Intensidade do Campo Elétrico E (kV/m)	Intensidade do Campo Magnético H (A/m)	Densidade do Fluxo Magnético B (T)
1 Hz – 8 Hz	5	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8 Hz – 25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
25 Hz – 50 Hz	5	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
50 Hz – 400 Hz	$2,5 \times 10^2 / f$	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
400 Hz – 3 kHz	$2,5 \times 10^2 / f$	$6,4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3 kHz – 10 MHz	$8,3 \times 10^{-2}$	21	$2,7 \times 10^{-5}$

Fonte: (ICNIRC, 2010)

Portanto, analisando-se as Tabelas 3 e 4, observa-se para uma frequência de 60 [Hz], valores limites para a população ocupacional de 8,33 [kV/m] para o campo elétrico e 1000 [μ T] para o campo magnético. Para a exposição do público em geral, tem-se 4,17 [kV/m] para campo elétrico e 200 [μ T] para o campo magnético.

A nível nacional, a Resolução Normativa N° 398, de 23 de Março de 2010, estabelece os níveis de referência para campos elétricos e magnéticos na frequência de 60 [Hz] de acordo com a Tabela 5: (ANEEL, 2010)

Tabela 5 - Níveis de Referência para Campos Elétricos e Magnéticos na Frequência de 60 [Hz].

	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μ T)
Público em Geral	4,17	83,33
Público Ocupacional	8,33	416,67

Fonte: (ANEEL, 2010)

Estes limites para exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos e magnéticos gerados por sistemas de energia elétrica que operam na faixa de

até 300 [GHz] são recomendados pela ONS e publicados pela diretriz de 1998 da ICNIRP.

Assim, de acordo com (ANEEL, 2010), caso os valores calculados ou medidos sejam superiores aos níveis de referência estabelecidos, o agente pode apresentar à ANEEL o Relatório de Conformidade. O Relatório de Conformidade é um documento elaborado e assinado por entidade competente contendo a memória de cálculo ou os resultados das medições utilizadas, com os métodos empregados, para verificar o atendimento às Restrições Básicas para exposição humana a campos elétricos e magnéticos (ANEEL, 2010).

Caso o agente opte por não realizar o Relatório de Conformidade ou o seu resultado demonstre o não atendimento às Restrições Básicas, deve ser apresentado o Plano de Adequação. O Plano de Adequação corresponde ao documento a ser apresentado à ANEEL, contendo no mínimo o cronograma físico-financeiro e os estudos técnicos que demonstrem a eficácia das medidas propostas para a adequação das instalações às Restrições Básicas (ANEEL, 2010).

3.3 Método de Cálculo do Campo Elétrico

Dado uma linha de transmissão trifásica disposta horizontalmente com 3 condutores nas fases “a”, “b” e “c”, submetidos a nível de tensão e considerando um sistema equilibrado com as suas respectivas fases defasadas de 120° elétricos. As fases estão distribuídas no espaço, possuindo coordenadas “x” e “y”. Assim, os valores de campo elétrico são dados por E_x e E_y . A Fig. 1 a seguir ilustra a metodologia de cálculo descrita posteriormente.

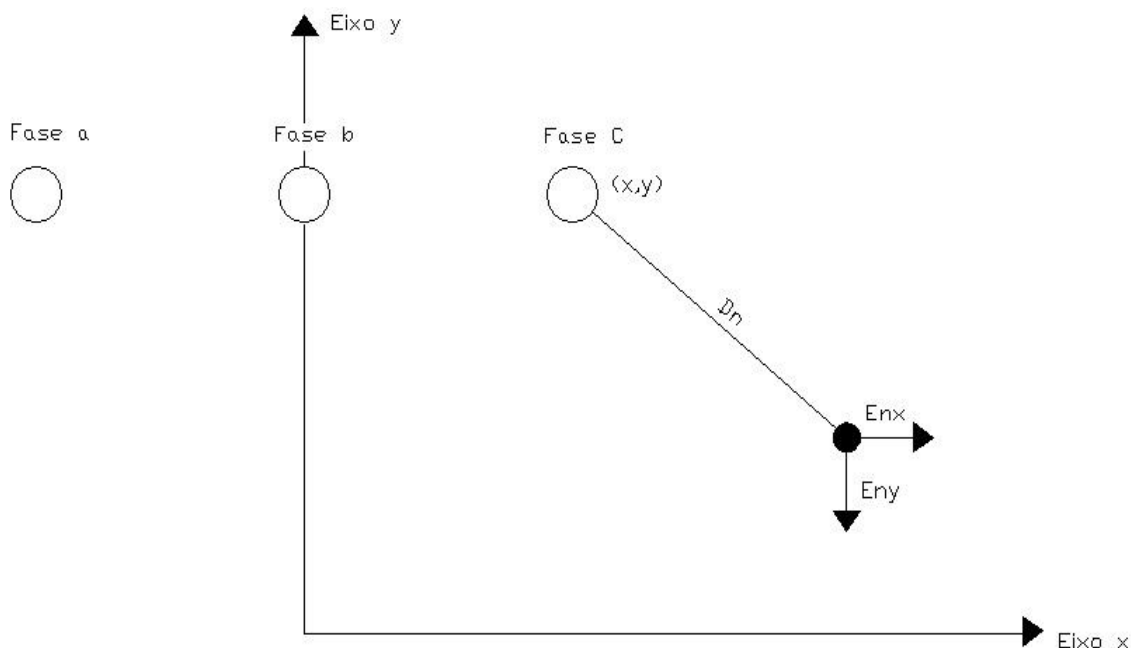


Figura 1 - Linha de Transmissão Trifásica Disposta Horizontalmente com o Respeetivo Campo Elétrico do Condutor C em um ponto "n".

O método para o cálculo de campo elétrico usado é o método de Simulação de Cargas que consiste na substituição da distribuição real de cargas elétricas na superfície dos condutores por 'n' linhas de cargas fictícias colocadas no interior do condutor. A simplicidade geométrica dos condutores de uma linha de transmissão permite considerar uma única linha de carga, cuja dimensão equivalente é dada pelo raio médio geométrico do condutor ou da fase se constituída por vários condutores, simplificando os cálculos. O cálculo do campo elétrico efetua-se a partir do conhecimento das cargas elétricas em cada uma das fases da linha. O solo é assumido como um condutor perfeito (SARMENTO, 2012).

Os valores das cargas, matriz [Q], são obtidas determinando o potencial dos condutores, matriz [V], e pela matriz [A], na solução da equação (3.1).

$$[Q] = [A]^{-1}[V] \tag{3.1}$$

Para um linha de transmissão composta por condutores paralelos sobre um solo perfeitamente plano, os elementos da matriz [A] são dados pela equação (3.2) e (3.3), para elementos próprios e mútuos, respectivamente (SARMENTO, 2012):

$$A_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot y_i}{d_{eq}}\right) \tag{3.2}$$

$$A_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{(x_i-x_j)^2 + (y_i+y_j)^2}{(x_i-x_j)^2 + (y_i-y_j)^2}\right)^{1/2} \quad (3.3)$$

Sendo:

y_i – distância vertical do condutor ao solo.

y_j – distância vertical do ponto de medida ao solo.

x_i – posição horizontal do condutor em relação ao eixo da LT.

x_j – posição horizontal do condutor ao ponto de medida.

d_{eq} – diâmetro equivalente do condutor nas fases.

ϵ_0 - permissividade elétrica do ar.

Para feixe de condutores é conveniente reduzir o feixe a um único condutor equivalente, sendo o diâmetro dado por:

$$d_{eq} = db \cdot \sqrt[n]{\frac{n \cdot d}{db}} \quad (3.4)$$

Onde:

n – número de subcondutores em um feixe.

d – diâmetro dos subcondutores.

db – diâmetro do feixe, dado pela seguinte equação.

$$db = \frac{s}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (3.5)$$

s – espaço entre condutores.

Determinando as cargas em cada condutor através da equação (3.1), pode-se calcular o campo elétrico devido a cada condutor em um ponto “n” nas coordenadas (x_n, y_n) . Portanto, o campo elétrico devido a carga no condutor ‘c’ é:

$$\vec{E}_c = E_{x,c} \cdot \vec{u}_x + E_{y,c} \cdot \vec{u}_y \quad (3.6)$$

Sendo:

\vec{u}_x e \vec{u}_y – vetores unitários horizontal e vertical, respectivamente.

São dados os campos elétricos da fase ‘c’ na direção ‘x’ e na direção ‘y’.

$$E_{x,c} = \frac{(qrc+jqic)(xn-xc)}{2\pi\epsilon_0[(xn-xc)^2+(yc-yn)^2]} - \frac{(qrc+jqic)(xn-xc)}{2\pi\epsilon_0[(xn-xc)^2+(yc+yn)^2]} \quad (3.7)$$

$$E_{y,c} = \frac{(qrc+jqic)(yn-yc)}{2\pi\epsilon_0[(xn-xc)^2+(yc-yn)^2]} - \frac{(qrc+jqic)(yn-yc)}{2\pi\epsilon_0[(xn-xc)^2+(yc+yn)^2]} \quad (3.8)$$

Generalizando-se, as componentes horizontal (E_x) e vertical (E_y) do campo elétrico são calculadas pela somatória de todas as contribuições dos condutores existentes. Para o caso da Fig. 1, tem-se 3 condutores, portanto, o campo elétrico das componentes horizontal e vertical são dadas pela somatória dos campos nas fases “a”, “b” e “c”.

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{x,a} + \vec{E}_{x,b} + \vec{E}_{x,c} \quad (3.9)$$

$$\vec{E}_y = \vec{E}_{y,a} + \vec{E}_{y,b} + \vec{E}_{y,c} \quad (3.10)$$

De acordo com as equações (3.7) e (3.8), as componentes horizontal e vertical do campo elétrico são constituídas de uma parte real e uma parte imaginária. Determinando-se o módulo do campo elétrico nas direções ‘x’ e ‘y’, tem-se, finalmente, o campo elétrico total definido em módulo.

$$|E| = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2} \quad (3.11)$$

O interesse deste trabalho é obter o mapeamento do perfil lateral do campo elétrico ao nível do solo recomendado pela ANEEL ($\approx 1,5m$). Assim, é desenvolvida uma rotina de cálculo na plataforma MATLAB® usando o método de Simulação de Cargas descrito anteriormente. O perfil lateral do campo elétrico ao nível do solo envolve ‘n’ pontos em um eixo perpendicular ao sentido longitudinal da linha de transmissão. No próximo capítulo, estas rotinas são validadas de acordo com as referências dadas no capítulo 2 deste trabalho.

3.4 Método de Cálculo do Campo Magnético

O objeto de estudo deste trabalho são linhas aéreas de transmissão. O cálculo do campo magnético de uma linha de transmissão qualquer percorrida por uma corrente ‘I’, pode ser visualizada na Fig. 2 a seguir.

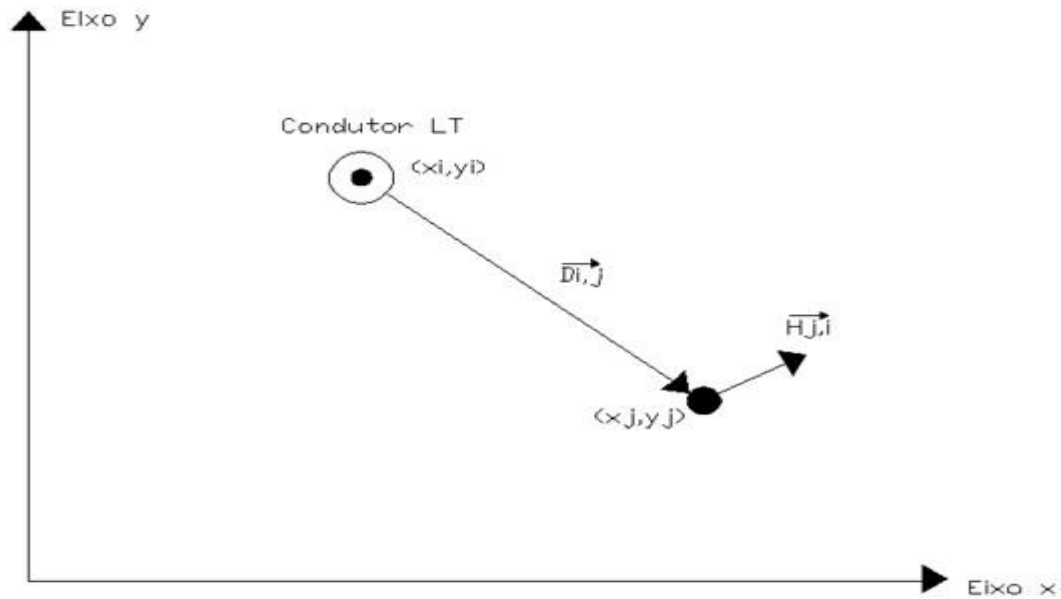


Figura 2 - Linha de Transmissão Percorrida por uma Corrente "I" em um ponto "i" e o seu Respetivo Campo Magnético no Ponto "j"

O campo magnético proveniente de uma linha de transmissão é calculado de acordo com a Lei de Biot-Savart (SARMENTO, 2012).

De acordo com a Fig. 2, a densidade de fluxo magnético no ponto "j" é dada por:

$$\vec{B}(j) = \frac{\mu_0 \cdot I_i}{2 \cdot \pi \cdot D_{i,j}} \vec{\Phi}_{i,j} \quad (3.12)$$

Para uma linha com diversos condutores, a densidade de campo magnético total é a soma de todas as contribuições das correntes percorridas nos condutores.

$$\vec{B}(j) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum \frac{I_i \cdot \vec{\Phi}_{i,j}}{D_{i,j}} \quad (3.13)$$

Sendo:

$\vec{D}_{i,j}$ – vetor posição do ponto 'j' em relação a corrente 'I'. Possui módulo de:

$$D_{i,j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (3.14)$$

$\vec{\Phi}_{i,j}$ – vetor unitário do produto vetorial do vetor corrente com o vetor posição.

$$\vec{\Phi}_{i,j} = -\frac{y_j - y_i}{D_{i,j}} \cdot \vec{u}_x + \frac{x_j - x_i}{D_{i,j}} \cdot \vec{u}_y \quad (3.15)$$

Com a equação (3.13) representando a densidade de campo magnético de uma linha de transmissão dado na unidade de Tesla, tem-se para o cálculo da intensidade de campo magnético da corrente “i” no ponto “j” expressado pela equação:

$$H_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi D_{i,j}} \quad (3.16)$$

Em notação vetorial, tem-se:

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{I_i \times \vec{r}_{i,j}}{2\pi D_{i,j}^2} = \frac{I_i}{2\pi D_{i,j}} \vec{\Phi}_{i,j} \quad (3.17)$$

O campo magnético total no ponto “j” dado pela soma de todas as contribuições das correntes.

$$H_j = \sum \frac{I_i}{2\pi D_{i,j}} \Phi_{i,j} \quad (3.18)$$

A intensidade de campo magnético de uma linha de transmissão pode ser calculada considerando as correntes no condutor mais a corrente de retorno pela terra (EPRI, 1982). Sendo o campo magnético afetado pela presença da corrente de retorno pela terra, a equação (3.19) é dada para este novo cálculo.

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi D_{i,j}} \vec{\Phi}_{i,j} - \frac{I_i}{2\pi D'_{i,j}} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{2}{\delta \cdot D'_{i,j}} \right)^4 \right] \vec{\Phi}'_{i,j} \quad (3.19)$$

O primeiro termo da equação (3.19) é o mesmo procedimento de cálculo para campo magnético descrito na equação (3.17). O segundo termo representa o fator de correção da corrente de retorno de terra.

Sendo:

$$\delta = [j\omega\mu (\sigma + j\omega\epsilon)]^{1/2} \quad (3.20)$$

Com “σ” a condutividade de terra, “ε” a permissividade da terra podendo ser usado o mesmo valor da permissividade do ar.

$$D'_{i,j} = [(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j + \frac{2}{\delta})^2] \quad (3.21)$$

$$\vec{\Phi}'_{i,j} = - \left[\frac{y_i + y_j + \frac{2}{\delta}}{D'_{i,j}} \right] \cdot \vec{u}_x + \left[\frac{x_i - x_j}{D'_{i,j}} \right] \cdot \vec{u}_y \quad (3.22)$$

A intensidade de campo magnético dada na unidade de [A/m] é obtida somando a contribuição da corrente em todos os condutores, incluindo o retorno pela terra.

Para uma distância perpendicular do eixo da linha de transmissão até um ponto de 100 metros, o retorno da corrente de terra tem um valor desprezível na composição do valor final para o cálculo do campo magnético (EPRI, 1982). Para este estudo, o retorno da corrente de terra pode ser desprezado, pois os pontos de cálculos não ultrapassaram o valor máximo de 100 metros.

Portanto, considerando-se uma linha trifásica disposta horizontalmente de acordo com a Fig. 3, tem-se o cálculo do campo magnético no ponto “P”.

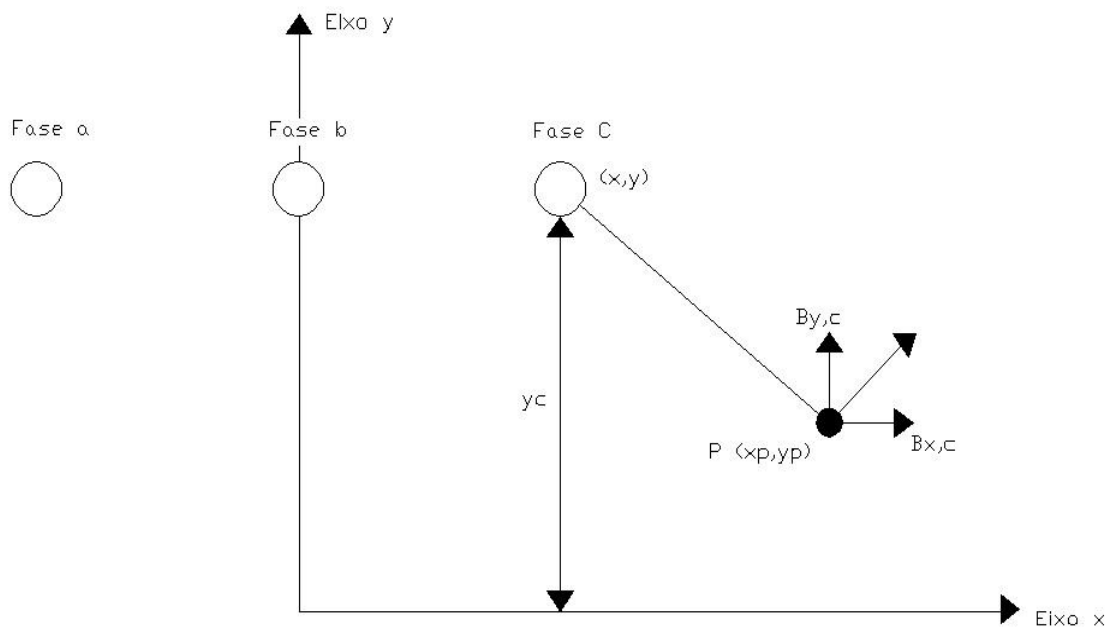


Figura 3 - Campo Magnético em um Ponto “P” de uma Linha de Transmissão Trifásica

$$\vec{H}_c = H_{x,c} \vec{u}_x + H_{y,c} \vec{u}_y \quad (3.23)$$

Sendo \vec{u}_x e \vec{u}_y os vetores unitários horizontal e vertical, respectivamente.

Os módulos de $H_{x,c}$ e $H_{y,c}$ são dados por:

$$H_{x,c} = \frac{I_c}{2\pi} \left\{ \frac{-(yp-yc)}{[(xc-xp)^2 + (yc-yp)^2]} - \frac{-(yp+yc)}{[(xc-xp)^2 + (yc+yp)^2]} \right\} \quad (3.24)$$

$$H_{y,c} = \frac{I_c}{2\pi} \left\{ \frac{(xp-xc)}{[(xc-xp)^2 + (yc-yp)^2]} - \frac{(xp+xc)}{[(xc-xp)^2 + (yc+yp)^2]} \right\} \quad (3.25)$$

Efetuada-se as somas das componentes vertical e horizontal da contribuição do campo magnético de cada fase, tem-se o valor em módulo:

$$H_x = H_{x,a} + H_{x,b} + H_{x,c} \quad (3.26)$$

$$H_y = H_{y,a} + H_{y,b} + H_{y,c} \quad (3.27)$$

As componentes vertical e horizontal são constituídas por parte real e imaginária. Portanto, o módulo do campo magnético da componente 'x' e componente 'y' pode ser dado por:

$$H_x = \sqrt{H_{x,r}^2 + H_{x,i}^2} \quad (3.28)$$

$$H_y = \sqrt{H_{y,r}^2 + H_{y,i}^2} \quad (3.29)$$

Por final, o campo magnético total em módulo:

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (3.30)$$

Para o cálculo em módulo da densidade de campo magnético dado em [T], tem-se a seguinte relação:

$$B = \mu.H \quad (3.31)$$

Sendo ' μ ' a permeabilidade magnética do meio. Considerando-se a permeabilidade do meio (μ) igual a permeabilidade magnética do vácuo (μ_0), tem-se o valor igual a $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m).

3.5 Considerações Finais

Analisando-se as Normas Regulamentadoras sobre o nível de campo elétrico e magnético de uma LT e conseqüentemente fazendo os seus respectivos cálculos, tem-se em mãos ferramentas necessárias para a análise de campo elétrico e magnético na faixa de segurança de uma LT.

No próximo capítulo, a atenção está voltada para o cálculo do gradiente de superfície do condutor, ao qual dependendo deste valor, inicia o efeito corona e suas conseqüências que são o ruído audível e a rádio interferência.

Capítulo 4

Descrição e Formulação Matemática dos Efeitos Corona, Ruído Audível e Rádio Interferência

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo é descrita toda a formulação matemática necessária para o cálculo do gradiente de potencial na superfície do condutor, nível de ruído audível e rádio interferência em uma Linha Aérea de Transmissão de Energia Elétrica.

São introduzidos os conceitos relativos aos fenômenos elétricos citados acima e definidos os valores limites de ruído audível e rádio interferência recomendados pelas normas vigentes.

4.2 Efeito Corona

Nos dias atuais, a exigência do aumento do nível de tensão da transmissão face aos crescentes comprimentos dos circuitos da LT, faz a manifestação do efeito corona tornar-se mais provável. No projeto de uma LT em AT, EAT e UAT, o efeito corona é um decisivo fator a ser considerado.

No projeto de uma linha de transmissão é fundamental a escolha mais adequada da sua respectiva geometria, tais como, altura das fases em relação ao solo, distanciamento entre as fases, número de subcondutores presentes em um feixe e o raio que este feixe deve assumir. Tais fatores são elementos decisivos na formação ou não do defeito corona e suas consequências.

A descarga de corona é formada em torno da superfície do condutor quando a intensidade do campo elétrico na superfície do mesmo excede o valor de ruptura do ar, causando luminescência, ruído audível, rádio interferência, vibração do condutor, eflúvios de ozônio entre outros, e ainda a perda de energia (FUCHS, 1977).

Uma série de condições controla essa tensão disruptiva, entre as quais, destacam-se a pressão do ar, a presença do vapor d'água, o tipo de tensão aplicada e a fotoionização incidente. No campo não uniforme em torno de um condutor, a divergência do campo exerce influência adicional, e qualquer partícula contaminadora, como poeira, transformam-se em fonte pontual de descargas (FUCHS, 1977).

As descargas elétricas são usualmente desencadeadas por um campo elétrico que aceleram elétrons livres através de um gás. Quando estes elétrons adquirem energia suficiente de um campo elétrico, eles podem produzir novos íons por colidirem com átomos de nitrogênio, oxigênio e outros gases presentes. Um processo denominado de ionização por impacto dos elétrons. Os elétrons que iniciam o processo de ionização são frequentemente criados por fotoionização (energia do fóton para ionizar um elemento) (FUCHS, 1977).

A maioria das colisões com os gases presentes no ar são colisões elásticas, ou seja, colisão entre dois ou mais corpos na qual estes não sofrem deformações permanentes durante o impacto. Os elétrons perdem apenas uma pequena parte da sua energia cinética em cada colisão (EPRI, 1982).

Ocasionalmente, um elétron pode atingir um átomo com força suficiente, de forma a excitá-lo. Nessas condições, o átomo atingido passa a um estado de energia mais elevado. O estado orbital de um ou mais elétrons muda e o elétron que colidiu com o átomo perde parte de sua energia, para criar esse estado. Mais tarde, o átomo excitado pode retornar ao seu estado normal, liberando o excesso de energia em forma de calor, luz, energia acústica e radiações eletromagnéticas. Um elétron pode também colidir (recombinar) com íons positivos convertendo o íon em um átomo neutro. Processo denominado recombinação na qual pode liberar excesso de energia (FUCHS, 1977).

Como os elétrons são conduzidos através de um gás por um campo elétrico, o processo de ionização básica é geralmente dado por:



Sendo:

A = átomo

e = elétron

Com um elétron colidindo com um átomo, outro elétron é liberado. Cada um destes elétrons pode então liberar 2 ou mais elétrons. Portanto, a reação de cadeia causa o aumento rápido da quantidade de elétrons (EPRI, 2005). A corrente de descarga de corona no processo de avalanche é dada na equação (2.1). Assim, toda a energia liberada ou irradiada deve provir do campo elétrico da linha, portanto, do sistema alimentador, para o qual representa perda de energia, por conseguinte, prejuízo (FUCHS, 1977).

4.2.1 Efeito Corona – Formação

Para que uma linha apresente um desempenho satisfatório face ao fenômeno de corona, é necessário que o gradiente de potencial na superfície dos condutores seja inferior ao valor do gradiente crítico visual dessa linha. Em algumas análises é possível considerar a não verificação do efeito corona para valores de gradiente de potencial inferior a 15 [kV/cm]. Outras observações sugerem um desempenho satisfatório para valores de gradiente de potencial abaixo de 17 [kV/cm] (FUCHS, 1977).

Para Peek (FUCHS, 1977), o valor do gradiente crítico visual em valores eficazes, pode ser calculado por:

$$E_{crv} = 21,6 \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r}}\right) \text{ [kV/cm]} \quad (4.2)$$

Sendo:

r = raio do condutor.

Para Miller (FUCHS, 1977), o valor do gradiente crítico visual em valores eficazes, pode ser válido para condutores múltiplos.

$$E_{crv} = 18,11 \cdot \left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r_{req}}}\right) \text{ [kV/cm]} \quad (4.3)$$

Sendo:

r_{eq} = raio equivalente dos condutores múltiplos dado por:

$$r_{eq} = [n.r.(R)^{n-1}]^{1/n} \quad (4.4)$$

O raio do feixe 'R' pode ser calculado por:

$$R = \frac{s}{2.\text{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (4.5)$$

Sendo 'r' o raio dos subcondutores pertencentes ao feixe, 'n' o total do número de subcondutores e 's' a distância (espaçamento) entre condutores.

Peek verificou, ainda, que o valor da tensão crítica disruptiva (E_{crv}) também depende da densidade do ar, ou seja:

$$E_{crv} = 18,1.\delta.\left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r_{eq}.\delta}}\right) \text{ [kV/cm]} \quad (4.6)$$

Onde:

$$\delta = \frac{0,386.b}{273+t} \quad (4.7)$$

t = Temperatura em [°C].

$$b = 760 - 0,086. h \text{ [mmHg]}. \quad (4.8)$$

Sendo h, a altitude do local, em [m].

No entanto, há de se destacar que as equações até agora se aplicam a condutores cilíndricos de superfícies polidas e secas, em condições ideais. Tanto Peek como Miller chegaram a um consenso quanto à influência das condições atmosféricas no valor do gradiente crítico visual. Para isso, propuseram a inserção de um fator corretivo, denominado de fator de superfície (m), dado por:

$$E_{crv} = 18,1.m.\delta.\left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r_{eq}.\delta}}\right) \text{ [kV/cm]} \quad (4.9)$$

Dos trabalhos de Miller, obtém-se a Tabela 6 a respeito dos diversos valores de fator de superfície.

Tabela 6 – Fatores de Superfície

Condições Superficiais dos Condutores	Fatores de Superfície (m)
Condutores cilíndricos, polidos e secos	1
Cabos novos, secos, limpos e sem abrasão	0,92
Cabos de cobre expostos ao tempo em atmosfera limpa	0,82
Cabos de cobre expostos ao tempo em atmosfera agressiva	0,72
Cabos de alumínio novos, limpos e secos, com condições de superfície decorrentes do grau de cuidado com que foram estendidos nas linhas (médias 0,60)	0,53 a 0,73
Cabos molhados, novos ou usados	0,16 a 0,25

Fonte: (FUCHS, 1977)

4.2.2 Efeito Corona – Cálculo de Perdas

A perda por efeito corona é totalmente dependente da condição climática onde a linha aérea de transmissão de energia está instalada. Diante das diversas condições climáticas, são consideradas as perdas por efeito corona com tempo bom e mau tempo.

O valor da perda corona com tempo bom é insignificante em comparação com a perda corona em mau tempo. No entanto, as perdas com tempo bom ocorrem por um longo período de tempo afetando o valor final da energia perdida.

Em estudo feito por (EPRI, 2005), é desenvolvido no capítulo 11 da referência, uma equação para o cálculo das perdas por efeito corona para a condição de mau tempo (presença de chuva).

$$P(\text{dB}) = 14,2 + 65.\log\left(\frac{E}{18,8}\right) + 40.\log\left(\frac{d}{3,51}\right) + k1.\log\left(\frac{N}{4}\right) + k2 + \frac{A}{300} \quad (4.10)$$

Onde:

E – gradiente médio superficial em [kV_{rms}/cm].

d – diâmetro do subcondutor em [cm].

N – número de subcondutores do feixe.

K1 = 13, para N ≤ 4.

K1 = 19, para N > 4.

K2 = 10.log $\left(\frac{I}{1,676}\right)$, para I (intensidade de chuva) ≤ 3,6 [mm/h].

$K_2 = 3,3 + 3,5 \cdot \log\left(\frac{I}{3,6}\right)$ para I (intensidade de chuva) $> 3,6$ [mm/h].

A = altitude do local em metros.

Segundo a mesma referência (EPRI, 2005), as perdas corona em bom tempo podem ser calculadas com 17 [dB] a menos quando do mesmo cálculo efetuado com tempo chuvoso.

As perdas corona calculadas anteriormente são dadas por fase. Para obter as perdas totais de uma LT basta fazer o somatório das perdas de cada fase. A conversão de perdas em [dB] para [W/m] é obtida através da seguinte igualdade:

$$P(\text{W/m}) = 10^{P(\text{dB})/10} \quad (4.11)$$

Uma comparação que pode ser feita entre as perdas pelo Efeito Joule das linhas de transmissão, que sabidamente dependem da carga da linha, com as perdas causadas pelo efeito corona, que dependem das condições climáticas, apontam que em média estas últimas são substancialmente inferiores àquelas. No entanto, as perdas máximas produzidas pelo efeito corona podem ser igual ou até maior que as perdas ôhmicas.

4.2.3 Efeito Corona – Cálculo do Gradiente de Potencial

Os Diferentes métodos para calcular o gradiente de potencial elétrico na superfície de condutores podem ser listados, entre eles, destacam-se:

- Método dos Coeficientes de Potencial de Maxwell
- Método de Markt e Mengele
- Método das Sucessivas Imagens
- Método da Simulação de Carga
- Método dos Elementos Finitos

O método adotado para o cálculo do gradiente de potencial na superfície de um condutor é o Método dos Coeficientes de Potencial de Maxwell. Para condutores múltiplos, o seu raio equivalente pode ser definido como o raio de um condutor cilin-

dro fictício, que se colocado com seu eixo longitudinal coincidindo com o do condutor múltiplo, apresentará o mesmo gradiente médio que aquele existente na superfície dos subcondutores (FUCHS, 1977).

O gradiente de potencial na superfície do condutor pode ser quantificado por:

$$E = \frac{Q}{2\pi r \epsilon_0} \quad [\text{V/m}] \quad (4.12)$$

Sendo 'Q' a carga em um condutor de raio 'r'.

Para a definição de capacitância, tem-se:

$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} \quad [\text{Farad}] \quad (4.13)$$

Podendo escrever:

$$[Q] = [C] [U] \quad (4.14)$$

A matriz de capacitâncias [C] de um sistema de 'n' condutores é igual à matriz inversa da matriz de coeficientes de potencial de Maxwell [A].

$$[C] = [A]^{-1} \quad (4.15)$$

Para a matriz de coeficientes de potencial de Maxwell [A], tem-se para os termos da diagonal, genericamente, o seguinte cálculo:

$$a_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h_i}{r_{eq}}\right) \quad (4.16)$$

Já os termos de fora da diagonal são definidos por:

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right) \quad (4.17)$$

Para obter um melhor detalhamento dos termos que compõem a matriz de potencial dos coeficientes de Maxwell, a ilustração mostrada na Fig. 4 deve ser observada.

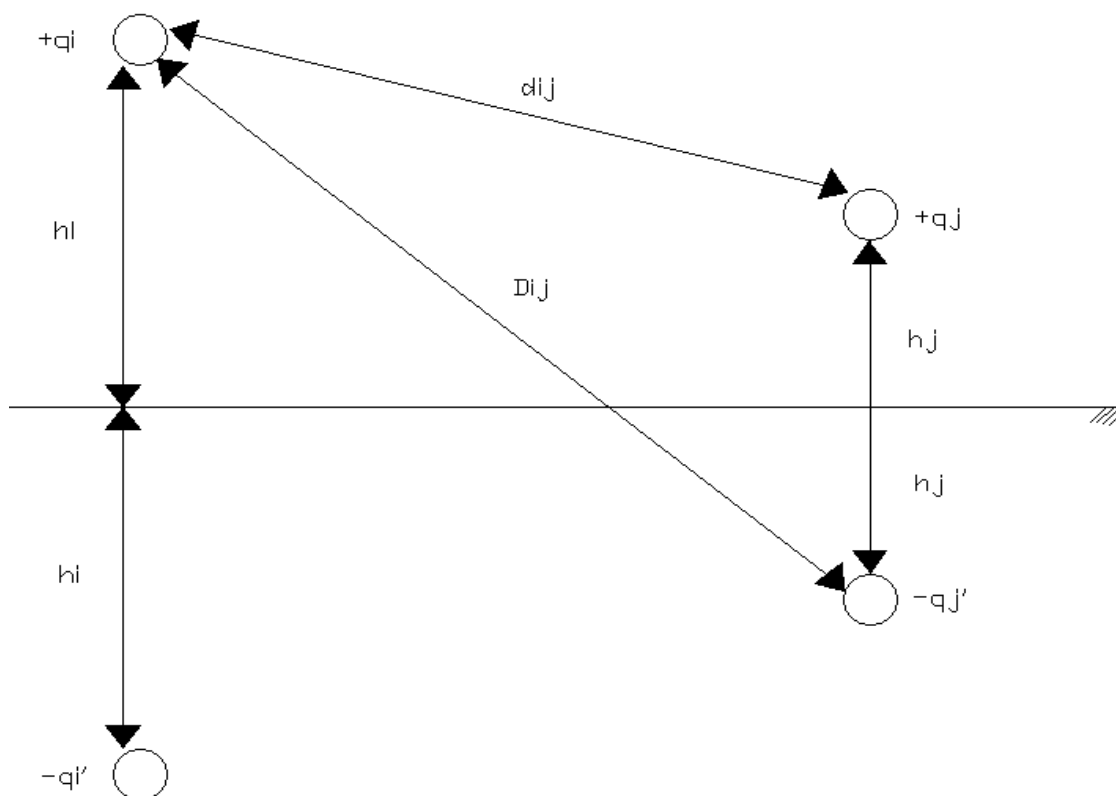


Figura 4 - Dois Condutores sobre o Solo e suas Respectivas Imagens

Sendo o solo terrestre considerado como um condutor de eletricidade, tem-se uma linha de transmissão aérea representada por um condutor com carga ' $+q_i$ ' e sua respectiva carga imagem como sendo ' $-q_i'$ '. A carga ' $-q_i'$ ' representa o ponto onde terminam as linhas de fluxo que emanam do condutor ' i ' com carga ' $+q_i$ ' (FUCHS, 1977). Para os parâmetros necessários para o cálculo dos termos da matriz de coeficiente de Maxwell, tem-se:

h_i – distância do condutor ' i ' ao solo.

$D_{i,j}$ – distância do condutor ' i ' a carga imagem do condutor ' j '.

d_{ij} – distância do condutor ' i ' ao condutor ' j '.

r_{eq} – raio equivalente do feixe de subcondutores.

Para determinar o raio equivalente do feixe dos condutores, utilizam-se as equações descritas em (4.4) e (4.5).

A matriz [A] terá dimensão quadrática e o seu tamanho é dependente do número de condutores e para-raios existentes no sistema. Para um sistema trifásico com um condutor para-raios, ter-se-á uma matriz com dimensão 4x4, por exemplo.

Portanto, de acordo com (FUCHS, 1977), o cálculo do vetor dos gradientes de potencial pode ser dado por:

$$[E_i] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0.n} \begin{bmatrix} 1 \\ r_i \end{bmatrix} [Q_i] \quad (4.18)$$

Unindo-se as equações (4.14) e (4.15) com a equação (4.18), tem-se:

$$[E_i] = \frac{1}{2.\pi.\epsilon_0.n} \begin{bmatrix} 1 \\ r_i \end{bmatrix} [A]^{-1} [U] \quad (4.19)$$

Sendo:

[E_i] – vetor de gradientes de potencial em [kV/cm].

$\begin{bmatrix} 1 \\ r_i \end{bmatrix}$ - matriz de raios dos condutores em [cm].

[A]⁻¹ – matriz inversa dos coeficientes de potencial de Maxwell.

[U] – vetor das diferenças de potencial entre condutores e solo.

n – número de subcondutores presentes no feixe.

Nas matrizes [A] e [A]⁻¹ os elementos próprios (da diagonal) são da ordem de grandeza bem superior a dos elementos mútuos (fora da diagonal), o que nos leva a concluir que, para efeito de cálculo dos gradientes, as cargas nos próprios condutores são predominantes. No instante em que estas são máximas, a dos condutores vizinhos são iguais à metade e de sinal oposto. Portanto, o vetor [U] poderá ser trocado por um novo vetor, dado por:

$$[U_i] = U.[\lambda_i] \quad (4.20)$$

Sendo $[\lambda_i]$:

$$[\lambda_a] = \begin{bmatrix} 1 \\ -0,5 \\ -0,5 \end{bmatrix}, \text{ quando } U_a = U_{\max} \quad (4.21)$$

$$[\lambda_b] = \begin{bmatrix} -0,5 \\ 1 \\ -0,5 \end{bmatrix}, \text{ quando } U_b = U_{\max} \quad (4.22)$$

$$[\lambda_c] = \begin{bmatrix} -0,5 \\ -0,5 \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ quando } U_c = U_{\max} \quad (4.23)$$

A fórmula geral para o gradiente de superfície do condutor, expressa em [kV/cm], pode ser generalizada como sendo:

$$[E_i] = \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot n} \left[\frac{1}{r_i} \right] [A]^{-1} [\lambda_i] \quad (4.24)$$

Os gradientes assim determinados representam os gradientes produzidos por cargas consideradas concentradas em filamentos coincidentes com os eixos dos respectivos condutores. Representam, pois, valores médios por condutor 'i' (E_{av}).

O valor máximo de gradiente de potencial na superfície de cada condutor, dado em [kV/cm], pode ser expresso por (IEEE COMMITTEE REPORT, 1979):

$$E_{\max} = E_{av} \cdot \left[1 + (n-1) \cdot \frac{r_i}{r_{eq}} \right] \quad (4.25)$$

4.3 Ruído Audível

Por ruído, entende-se como uma sensação auditiva incomodativa ao ouvido humano. Existem várias fontes de ruído audível presentes na natureza. No entanto, neste trabalho é analisada uma fonte de ruído peculiar, que é a LT em AT, EAT e UAT.

Normalmente, as linhas de transmissão contribuem muito pouco para a emissão de ruídos audíveis em comparação com ocorrências de outros ruídos, como por exemplo, os produzidos por veículos, aviões entre outros.

O ruído audível proveniente de linhas de transmissão ocorre principalmente em condições de mau tempo. Em condições de bom tempo, o condutor usualmente opera abaixo do nível da manifestação do efeito corona. Além das condições do tempo que influenciam a produção de ruído audível, pode-se citar o efeito da geometria da linha, como o número de subcondutores presente no feixe e diâmetro do condutor.

Sendo normalmente expresso em decibéis [dB], o ruído audível em uma LT surge quando o gradiente crítico disruptivo do ar é excedido pelo gradiente de potencial na superfície do condutor, ou seja, quando a LT está na condição em que o efeito corona se manifesta, conforme está descrito na Subseção 4.2.1.

Também, as cadeias de isoladores são uma fonte de ruído. Para isoladores de cerâmica ou vidro, a sua alta aderência, principalmente em lugares com alta concentração de poluição, faz com que acumule resíduos, tornando-se uma fonte pontual de ruído audível. Uma das soluções para este problema seria a manutenção periódica dos isoladores.

No entanto, a base de cálculo de ruído audível neste trabalho está inteiramente voltada para a extensão total da LT, descrito a seguir.

4.3.1 Ruído Audível – Método de Cálculo

O ruído audível é calculado como o nível sonoro emitido por um condutor. A condição climática pode ser considerada responsável pela sua intensidade emitida por uma LT. O ruído audível é classificado por três características em relação às condições climáticas:

- na primeira característica, define-se a condição de chuva forte (L_5), isto é, quando o nível de ruído é excedido em 5% do tempo na presença de chuva. (EPRI, 2005).
- Para condutor molhado (L_{50}), considera-se o nível de ruído audível excedido em 50% do tempo (EPRI, 2005).
- A última característica é referente ao nível de ruído audível na condição de tempo bom. De acordo com (EPRI, 2005), nesta condição o valor de ruído audível é considerado inexistente. Caso seja necessário obter um valor aproximado para esta condição, a subtração de 25 [dB] para condutor molhado (L_{50}) é válido.

O cálculo do ruído audível pode ser dividido em 2 tipos. O primeiro tipo especifica para uma particular configuração de linha e nível de tensão, por exemplo, configura-

ção horizontal, circuito simples e classe de tensão 500 [kV]. O segundo tipo pode ser aplicado para diferentes configurações e níveis de tensão, como configuração triangular, vertical e circuito duplo (EPRI, 2005).

O primeiro tipo usualmente apresenta uma fórmula genérica, dada por:

$$SL = Ano + k_1 f_1(E) + k_2 f_2(n) + k_3 f_3(d) + k_4 f_4(D) \quad (4.26)$$

Sendo:

SL – nível ruído.

Ano – nível ruído referência.

E – gradiente de superfície do condutor.

n – número de subcondutores em cada feixe.

d – diâmetro do subcondutor.

D – distância da linha ao ponto de medida.

Já o segundo método calcula o nível de ruído produzido por cada fase da linha ao ponto de medida. Geralmente possui uma equação similar a (4.26) para calcular o nível de ruído de cada fase.

Neste trabalho a expressão considerada para o cálculo do ruído audível na condição de chuva forte é o método proposto pelo EPRI, utilizando uma forma de cálculo descrito no segundo método. A escolha deste método justifica-se pela possibilidade de aplicação em linhas de transmissão de classes de tensão entre 230 a 1500 [kV]. Além da possibilidade de uso para o cálculo do ruído audível nas condições de chuva pesada (L_5) e condutor molhado (L_{50}) e, finalmente, na possibilidade de cálculo para qualquer geometria da linha de transmissão.

O nível de pressão sonora, devido a cada fase, para a condição de chuva forte, é dado por:

Para número de subcondutores (n) por fase menor do que 3, tem-se:

$$P_i = 20.\log(n) + 44.\log(d) - \frac{665}{E_{\max}} + kn + 75,2 - 10.\log(D) - 0,02.D \quad (4.27)$$

Para número de subcondutores maior ou igual a 3, tem-se:

$$P_i = 20 \cdot \log(n) + 44 \cdot \log(d) - \frac{665}{E_{\max}} + (22,9 \cdot (n-1) \cdot \frac{d}{d_{\text{eq}}}) + 67,9 - 10 \cdot \log(D) - 0,02 \cdot D \quad (4.28)$$

Sendo:

n – número de subcondutores.

d – diâmetro do subcondutor em [cm].

d_{eq} – diâmetro equivalente do feixe em [cm].

E_{\max} – gradiente máximo de superfície do condutor em [kV/cm].

D – distância da linha ao ponto de medição em [m].

Para $n=1$; $k_n = 7,5$ [dB].

Para $n=2$; $k_n = 2,6$ [dB].

Calculando-se o nível de ruído audível para cada fase através da equação (4.27) ou (4.28), obtém-se o nível global de emissão de ruído audível de uma LT através da seguinte fórmula:

$$SL = 10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^j 10^{P_i/10} \right) \quad (4.29)$$

Para condutor molhado (L_{50}), o nível de ruído é calculado por adicionar um fator de correção (C_w) ao nível de ruído para chuva pesada (L_5). Primeiramente, calcula-se o fator 'Ec' que depende apenas do número de subcondutores 'n' e do diâmetro 'd' em [cm] do subcondutor (EPRI, 1982).

Para um número menor ou igual a 8 subcondutores por feixe, tem-se:

$$E_c = \frac{24,4}{d^{0,24}} \quad (4.30)$$

Na possibilidade de um número maior que 8 subcondutores por feixe:

$$E_c = \frac{24,4}{d^{0,24}} - 0,25 \cdot (n-8) \quad (4.31)$$

A correção para condutor molhado (C_w) para um número de subcondutores menor do que 3, é dada por:

$$C_w = 8,2 - \frac{14,2.Ec}{E_{max}} \quad (4.32)$$

Para $n \geq 3$:

$$C_w = 10,4 - \frac{14,2.Ec}{E_{max}} + [8.(n-1). \frac{d}{d_{eq}}] \quad (4.33)$$

Sendo:

E_{max} – gradiente máximo de superfície do condutor em [kV/cm].

n – número de subcondutores.

d – diâmetro do subcondutor em [cm].

d_{eq} – diâmetro do feixe em [cm].

Assim, o ruído audível para condutor molhado (L_{50}) é determinado pela adição da pressão do som no cabo (P_i) para chuva forte (L_5) com a correção do gradiente (C_w). Depois, utiliza-se a equação (4.29) para obter o nível global de ruído audível emitido por uma LT.

4.3.2 Valores Limites para Ruído Audível

Para valores limites para o nível de ruído audível gerado por uma LT, a referência (ONS, 2000), estabelece que no limite da faixa de segurança, quando a LT estiver submetida à tensão máxima operativa, dever ser, no máximo, igual a 58 [dB] nas condições não simultâneas de chuva fina ($<0,00148$ [mm/min]), durante névoa de 4 horas de duração ou durante os primeiros 15 minutos após a ocorrência de chuva. Todas estas condições tem-se a característica de condutor molhado.

4.4 Rádio Interferência

Com uma das possíveis consequências do efeito corona em LTs, a rádio interferência (RI) são emissões eletromagnéticas que podem afetar a qualidade de recepção de um equipamento, limitando o seu efetivo desempenho eletroeletrônico e de comunicação.

A rádio interferência é a degradação de um sinal desejado causado por perturbações de radiofrequência.

O ruído de uma linha de transmissão depende principalmente da distância da LT ao medidor, geometria da linha de transmissão e condições climáticas.

Para a distância da LT ao equipamento medidor, tem-se o perfil lateral do nível de RI de uma LT. O perfil lateral descreve como o nível de RI cai com o aumento da distância do ponto de medida à linha.

Para a geometria da linha, vários fatores são levados em consideração, como: número de subcondutores em uma fase, condições dos condutores, espaçamento de fases e altura da linha em relação ao solo.

O número de subcondutores em uma fase e os seus respectivos diâmetros são parâmetros que têm efeito significativo no nível de RI. Um aumento em ambos resulta em uma redução do gradiente de potencial na superfície do condutor e consequentemente no nível de RI emitido. Aumentando o espaçamento entre as fases e a altura dos condutores em relação ao solo, também implica numa diminuição do gradiente e posteriormente do nível de RI.

As imperfeições dos condutores faz com que o gradiente de potencial superficial crítico seja muito maior para esta condição em comparação para condutores com superfície perfeita. Para um gradiente de potencial superficial crítico maior, mais rápido é a descarga corona e, consequentemente, o aparecimento dos ruídos de rádio interferência.

As condições climáticas são fatores determinantes no aparecimento da RI. Para a condição de tempo com chuva forte (L_1), sendo L_1 o nível de RI que excedeu somente em 1% do período de tempo, ter-se-á um alto nível de ruído para a LT. De outra

forma, o nível de RI é inferior quando se considera a condição de tempo bom (Fair L_{50}). Para condutor molhado (L_{50}) considerando os valores de RI excedidos em 50% do tempo, quando se considera apenas uma chuva fraca ou após um período com precipitação, tem-se também valores consideráveis de emissão de ruído, no entanto com valor menor para a condição de tempo com chuva forte (L_1).

O cálculo da rádio interferência de uma linha de transmissão pode ocorrer através de duas técnicas de cálculos, ou seja, método comparativo e método analítico.

Ambos os métodos possuem vantagens e desvantagens. A maior vantagem para o método comparativo é a sua simplicidade. Também a precisão pode ser boa se os dados de referência são bons e as variações do caso de referência são pequenas. Caso contrário, ter-se-á a desvantagem de ser um método impreciso. A sua grande desvantagem é de ser um método inflexível. Os métodos são geralmente aplicáveis para um único tipo de linha para a qual os dados de referência estão disponíveis (EPRI, 1982).

Para o método analítico, a maior vantagem é a sua flexibilidade. O método é usado para avaliar o desempenho do ruído para qualquer geometria de linha. A sua principal desvantagem é a sua alta complexibilidade.

4.4.1 Método de Cálculo – Método Comparativo

Os métodos comparativos têm uma única fórmula geral. Comparam-se os dados medidos de uma linha nova, com uma determinada geometria, com os dados medidos de uma linha tomada como referência, cuja geometria é conhecida e para a qual as medidas já foram analisadas e os fatores de correção já foram aplicados.

A fórmula geral para o cálculo do método comparativo é dada por (EPRI, 1982):

$$E = E_o + E_g + E_d + E_n + E_D + E_f + E_{fw} \quad (4.34)$$

Sendo:

E_o – nível de RI da linha de referência.

E_g – fator de correção pela variação do gradiente.

E_d – fator de correção por diâmetro do condutor.

E_n – fator de correção pela variação do número de subcondutores.

E_D – variação da distância do condutor ao ponto de observação.

E_f – variação de frequência.

E_{fw} – condições climáticas.

Dos 8 métodos apresentados por (JUETTE, 1973), um método é escolhido para o cálculo do nível de RI. O método FG (Germany), baseia-se no emprego de um valor de referência (E_0) para tempo bom ($E_w=0$). A escolha do método é devida a sua alta aplicabilidade, envolvendo tensões nominais em 230, 275, 330, 400, 500 e 750 [kV].

$$E = 53,7 \pm 5 + k.(E_{\max} - 16,95) + 40.\log.(d/3.93) + E_n + 20.kd.\log(20/D) + E_{fw} \quad (4.35)$$

Com:

$k = 3$ para tensão de 750 [kV].

$k = 3,5$ para outras linhas com gradientes limites de 15-19 [kV].

E_{\max} = gradiente máximo na superfície do condutor em [kV/cm].

d = diâmetro do condutor em [cm].

n = número de condutores por fase.

D = distância radial do condutor mais próximo ao medidor.

$E_n = -4$ [dB], para condutor simples.

$E_n = 10.\log(\frac{n}{4})$, para $n > 1$.

$K_d = 1.6 \pm 0,1$, para faixa de frequência entre 0,5 a 1 [MHz].

$E_{fw} = 0$, para tempo bom.

$E_{fw} = 17 \pm 3$, para tempo com chuva.

4.4.2 Método de Cálculo – Método Analítico

A presença de rádio interferência proveniente de uma LT é determinada por duas propriedades da linha: geração e propagação.

A geração de corona causa pulsos de correntes que são injetados nos condutores. As correntes e suas respectivas tensões se propagam pela LT. O cálculo da RI, expresso em termos da função de geração (Γ), envolve propagação de correntes e tensões ao longo de um sistema de condutores paralelos. Para frequências de RI ao redor de 1 [MHz], os comprimentos das ondas de propagação são geralmente maiores do que as dimensões da linha, altura e espaçamento entre fases. Assim, o campo pode ser considerado quase estático.

Em (PHAIBOON, VIVEK e SOMKUARNPANIT, 2000), traz o método de cálculo analítico considerando a rádio interferência induzido por corona composto por 2 tipos. O primeiro é o RI irradiado por condições típicas. O outro é relativo a mudança de fatores ambientais. O RI total é resultado da soma das respectivas componentes.

O cálculo de RI irradiado por condições típicas envolve a propagação de correntes e tensões ao longo da linha. Estas tensões e correntes podem ser analisadas no domínio modal ou no domínio das fases. A propagação de correntes e tensões envolve equações diferenciais e suas respectivas soluções dadas pela exponencial da constante de propagação. A constante de propagação (γ) é dado por:

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} \quad (4.36)$$

Sendo:

[Z] – matriz de impedância série da linha de transmissão.

[Y] – matriz de admitância shunt da linha de transmissão.

Portanto, para um sistema trifásico têm-se os vetores [Z] e [Y] dado por matrizes 3x3.

Assim, é evidente a complexidade da solução das equações diferenciais para a propagação de corrente e tensão ao longo da linha.

Para contornar este problema, pode-se usar a análise modal para tensões e correntes. Na análise modal, uma linha de 'n' fases pode ser representada por 'n' linhas monofásicas desacopladas. Assim, elimina-se o acoplamento entre as fases da linha, tornando-se mais fácil a obtenção da solução das equações diferenciais.

Para o RI por condições típicas sobre chuva forte (L_1), primeiramente, determina-se a magnitude da corrente de geração de corona (Γ_i) para cada fase, expressa por:

$$\Gamma_i(n,d) = 78 - (580/E_i) + 38.\log(d/3,8) + kn \quad (4.37)$$

Onde 'd' é o diâmetro do condutor em [cm] e 'n' o número de subcondutores. 'Kn' é o fator dependente de 'n', ou seja, se $n < 8$ faz-se $kn = 0$. Caso contrário, $n > 8$, assume-se $kn = 5$. Assim, a matriz de geração assume a seguinte forma:

$$[\Gamma] = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_3 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Então, determina-se a corrente inicial na fase, 'io', em cada condutor, no ponto $z=0$, ao longo da linha devido a $[\Gamma]$.

$$[io] = \frac{[C].[\Gamma]}{2.\pi.\epsilon_0} \quad (4.39)$$

onde [C] é a matriz da capacitância dependente da geometria da linha.

Uma vez conhecida a corrente na fase inicial, a tensão na fase inicial, [vo], agora pode ser determinada fazendo:

$$[vo] = [zo].[io] \quad (4.40)$$

sendo [zo] a matriz de impedância característica da linha, calculada por:

$$[zo] = 60.[A] \quad (4.41)$$

[A] – Matriz de Potencial de Maxwell, dado pelos termos das equações (4.16) e (4.17).

Então, transformando-se as tensões de fase iniciais em tensões modais iniciais $[V_{ko}^m]$.

$$[V_{ko}^m] = [S]^{-1}[vo] \quad (4.42)$$

O índice (m) significa o número do modo e (k) o respectivo condutor da fase.

[S] é a matriz de transformação modal que é determinada pelo cálculo dos autovetores da matriz [B], dada por:

$$[B] = [Z][Y] \quad (4.43)$$

Determinando-se a magnitude da tensão modal no ponto 'z' ao longo da linha $v_{kz}^{(m)}$

$$v_{kz}^{(m)} = v_{ko}^{(m)} \cdot e^{-\alpha^{(m)}z} \quad (4.44)$$

$\alpha^{(m)}$ é a constante de atenuação de propagação ao longo da linha, dada por:

$$\gamma^{(m)} = \alpha^{(m)} + j\beta^{(m)} \quad (4.45)$$

Considerando-se apenas a parte real da constante de propagação, tem-se que a constante de atenuação é igual a:

$$\alpha^{(m)} = \sqrt{ZY} \quad (4.46)$$

Fazendo agora a transformação da tensão modal para a tensão de fase, tem-se:

$$[v_{k0}] = [S] \cdot [v_{ko}^{(m)}] \quad (4.47)$$

A intensidade do campo, e_k , pode ser determinada pela distância lateral da linha com as tensões v_{kz} .

$$e_k = [F1 \ F2 \ F3] \cdot [A]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{1z} \\ v_{2z} \\ v_{3z} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

A matriz [F1 F2 F3] definida por:

$$F_i = \frac{2hi}{(hi^2 + xi^2)} \quad (4.49)$$

hi – altura do condutor em relação ao solo

xi – distância lateral da linha ao ponto de medição

A intensidade total do campo (E_k) devido a uma distribuição uniforme de corona no condutor 'k' pode ser calculada por integrar 'ek' sobre todo o comprimento da linha.

$$E_k = \sqrt{2 \cdot \int ek^2 dz} \quad (4.50)$$

Com as contribuições individuais das fases E_a , E_b e E_c , obtém-se a intensidade do campo total de RI calculado por:

Se, por exemplo, $E_a > E_b > E_c$ e $E_a > E_b + 3$:

$$E_{\text{total}} = E_a \quad (4.51)$$

Senão:

$$E_{\text{total}} = \frac{E_a + E_b}{2} + 1,5 \quad (4.52)$$

O desenvolvimento feito acima vale para o caso de chuva forte (L_1). Para a condição de condutor molhado (Foul L_{50}), considera-se o desenvolvimento descrito em (EPRI, 1982).

$$\text{Foul } L_{50} = L_1 + c_w \quad (4.53)$$

Sendo ' c_w ' o fator de correção dado por:

$$c_w = 8,2 - (14,2/E_r) \quad (4.54)$$

$$E_r = E/E_c \quad (4.55)$$

Sendo ' E ' o nível de gradiente de potencial máximo no condutor e ' E_c ' dado por:

$$E_c = 24,4/(d^{0,24}), \text{ para } n \leq 4 \quad (4.56)$$

$$E_c = 24,4/(d^{0,24}) - 0,5.(n-4), \text{ para } n > 4 \quad (4.57)$$

d – diâmetro do condutor em [cm]

Para a condição de tempo bom (Fair L_{50}), onde os valores têm 50% de probabilidade de serem excedidos em tempo bom, o seu cálculo é dado em função dos cálculos para condutor molhado (Foul L_{50}), dado por:

$$\text{Fair } L_{50} = \text{Foul } L_{50} - 17 \text{ dB} \quad (4.58)$$

Para a correção do nível de RI emitido por uma linha em função da temperatura e pressão barométrica do local, a Fig. 5, dado em função da densidade relativa (δR), pode ser utilizada.

A densidade relativa é dada em função da temperatura (T) em [°C] e da pressão barométrica (b) do local em [mmHg].

$$\delta R = \frac{0.39b}{273 + T} \quad (4.59)$$

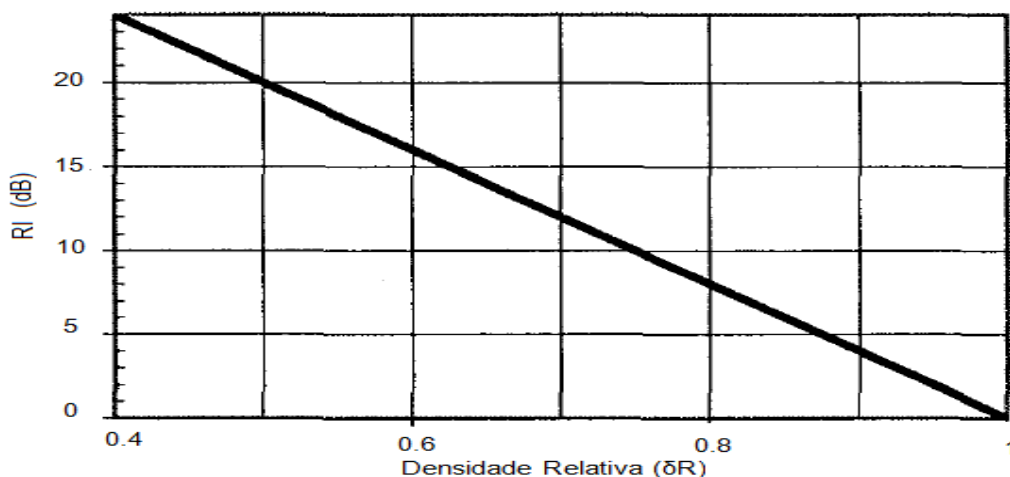


Figura 5 - Nível de RI adicionado em Relação à Densidade Relativa (δR)
 Fonte: (PHAIBOON, VIVEK e SOMKUARNPANIT, 2000)

Para a influência da condutividade do solo na propagação do nível de RI emitido por uma linha de transmissão, a Fig. 6 corrige o valor. A condutividade do solo de 100 [Ω.m] é considerada referência e nenhum valor é adicionado, considerando o solo com este valor de condutividade.

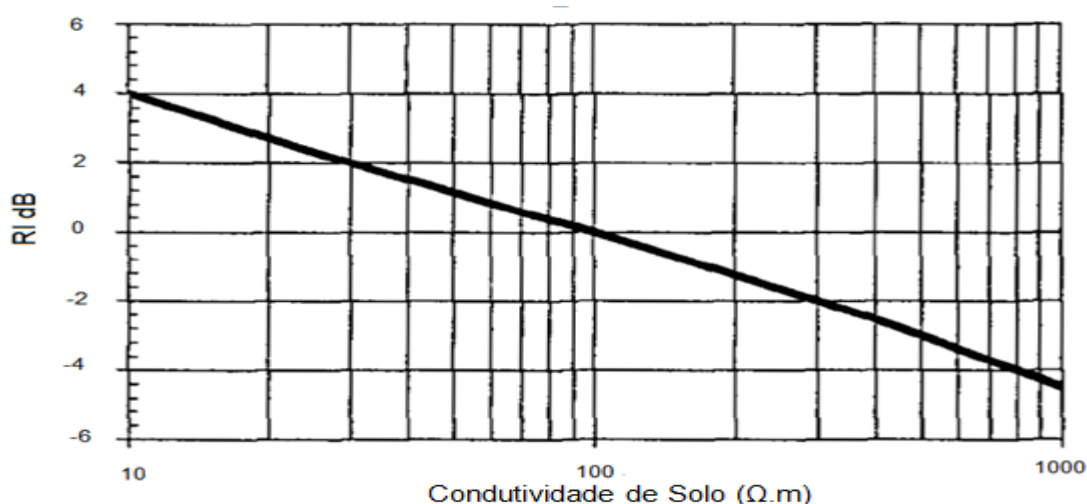


Figura 6 - Nível de RI adicionado em Relação à Condutividade do Solo
 Fonte: (PHAIBOON, VIVEK e SOMKUARNPANIT, 2000)

Para a frequência considerada na emissão de RI, o valor de 1 [MHz] é considerada como referência. Para este valor, não é adicionado nenhum valor de RI no montante final. Assim, a Fig. 7 estabelece valores de RI a serem adicionados de acordo com sua respectiva frequência.

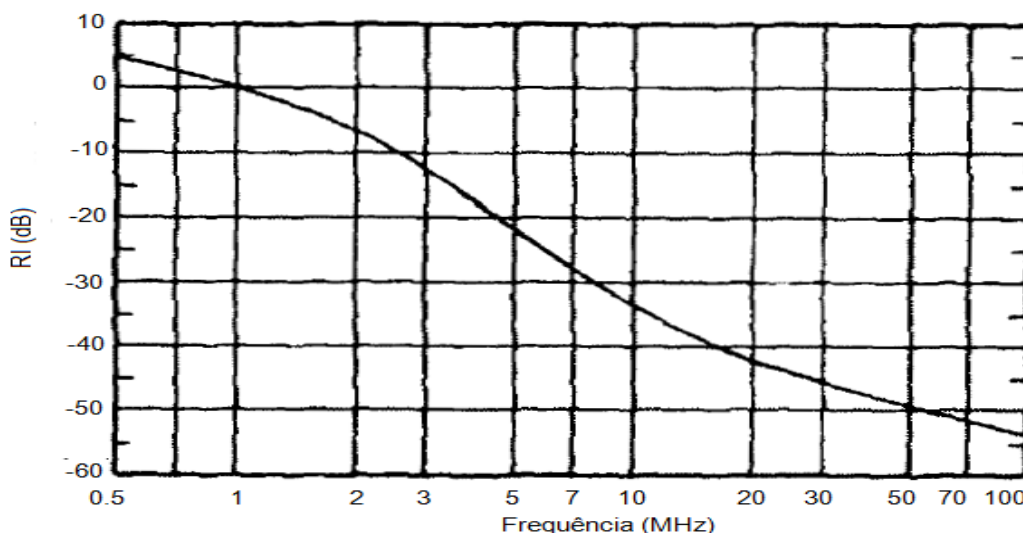


Figura 7 - Nível de RI adicionado em Relação à Frequência
 Fonte: (PHAIBOON, VIVEK e SOMKUARNPANIT, 2000)

4.4.3 Valores Limites do Nível de Rádio Interferência

A ANEEL especifica que a relação sinal/ruído no limite da faixa de segurança deve ser no mínimo 24 [dB] para 50% das condições climáticas ocorrendo no período de um ano. O sinal adotado para o cálculo deve ser o nível mínimo de sinal na região atravessada pela LT. Como os sinais de comunicação apresentam magnitudes superiores a 66 [dB/1µV/m] a 1 [MHz], obtém-se o nível máximo de rádio interferência admissível no limite da faixa de segurança em pelo menos 50% de todos os tempos de um ano através de (MACHADO, FERNANDE, *et al.*, 2007):

$$RI_{\max} \leq (66 - 24) \text{ [dB]} \tag{4.60}$$

Nível máximo de rádio interferência no limite da faixa de segurança é:

$$RI_{\max} \leq 42 \text{ [dB]} \tag{4.61}$$

Portanto, fica definido o valor máximo de rádio interferência no limite da faixa de segurança em 42 [dB].

4.5 Considerações Finais

Existem na literatura muitas pesquisas relacionadas aos cálculos dos parâmetros abordados neste capítulo. Todos estes assuntos possuem várias propostas de cálculo que muitas vezes levam a um resultado em comum com uma pequena variação de um resultado em comparação com outro. Assim, os métodos de cálculo apresentados neste texto somente demonstram confiança se for provado a sua veracidade. Portanto, no próximo capítulo é validada cada metodologia de cálculo através de medidas reais efetuadas ao longo dos anos de pesquisas obtidas através das referências bibliográficas consultadas.

Capítulo 5

Validação dos Métodos de Cálculo e Análise da Faixa de Segurança da LT

5.1 Considerações iniciais

Nos capítulos 3 e 4, são consideradas a modelagem matemática dos cálculos de campo elétrico, campo magnético, gradiente de potencial, ruído audível e rádio interferência. Com base nas metodologias apresentadas, os respectivos algoritmos de cálculo são implementados na plataforma MATLAB®. O presente capítulo faz a validação dos resultados obtidos comparando-os com aqueles identificados no estudo bibliográfico feito no Capítulo 2. Adicionalmente, é realizada a análise da largura da faixa de segurança de uma linha de transmissão diante de um caso base.

5.2 Fluxograma de Cálculo de Campo Elétrico

O algoritmo básico de cálculo do campo elétrico é visualizado na Fig. 8.

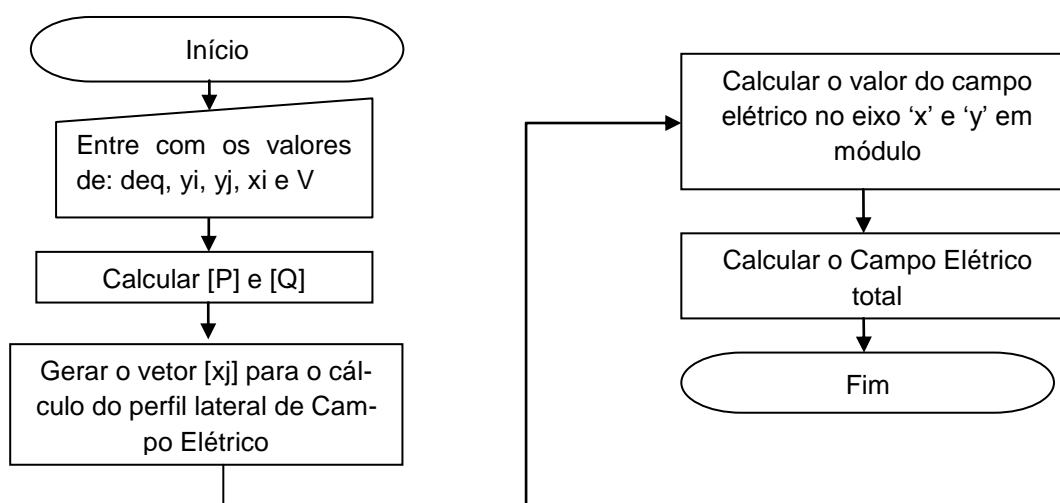


Figura 8 – Fluxograma de Cálculo de Campo Elétrico

5.3 Validação – Método de Cálculo de Campo Elétrico

Para a validação do cálculo de campo elétrico de uma LT, a referência (EPRI, 2005) é usada. A Fig. 9 refere-se ao gráfico calculado em uma rotina de programação produzida neste trabalho. A Fig. 10 refere-se ao conteúdo usado para a verificação deste cálculo. A configuração da LT está elencada na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados da LT para Cálculo do Campo Elétrico

Configuração da LT	
Tensão de Operação (kV)	525
Espaçamento Entre Fases Adjacentes (m)	10
Altura dos Condutores (m)	10,6
Número de Condutores por Fase	3
Número de Fases	3
Espaçamento Entre Subcondutores (cm)	45
Diâmetro dos Subcondutores (cm)	3,3
Configuração	Horizontal

Fonte: (EPRI, 2005)

A Fig. 9 mostra os resultados obtidos através do algoritmo implementado na plataforma Matlab® para o perfil lateral de campo elétrico da LT, visualizado em 2D.

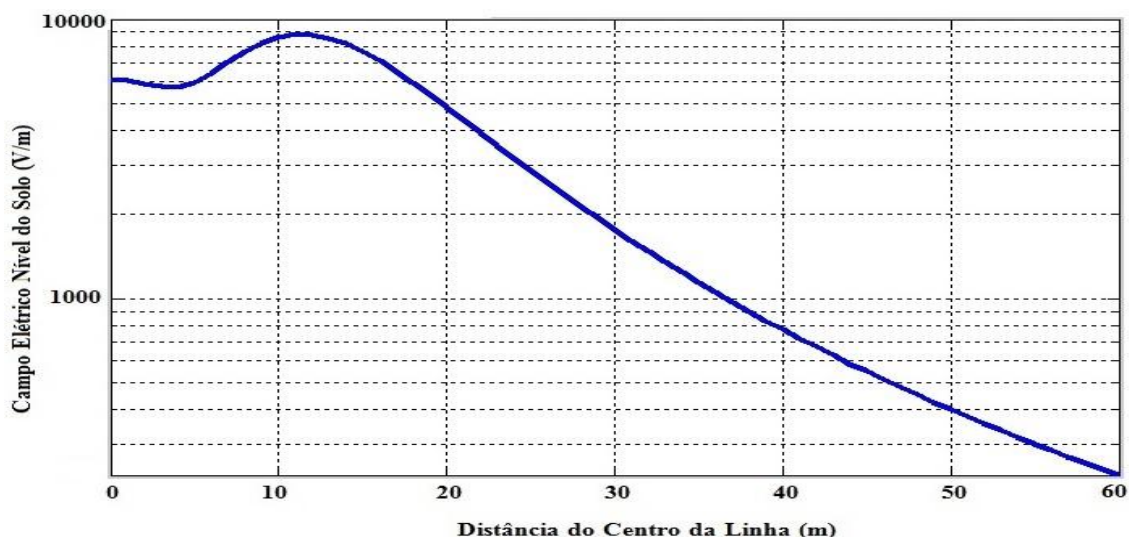


Figura 9 - Perfil Lateral do Campo Elétrico

A Fig. 10, por sua vez, corresponde ao perfil lateral de campo elétrico da LT. O gráfico inserido é para efeito de comparação e validação do cálculo realizado e exposto na Fig. 9.

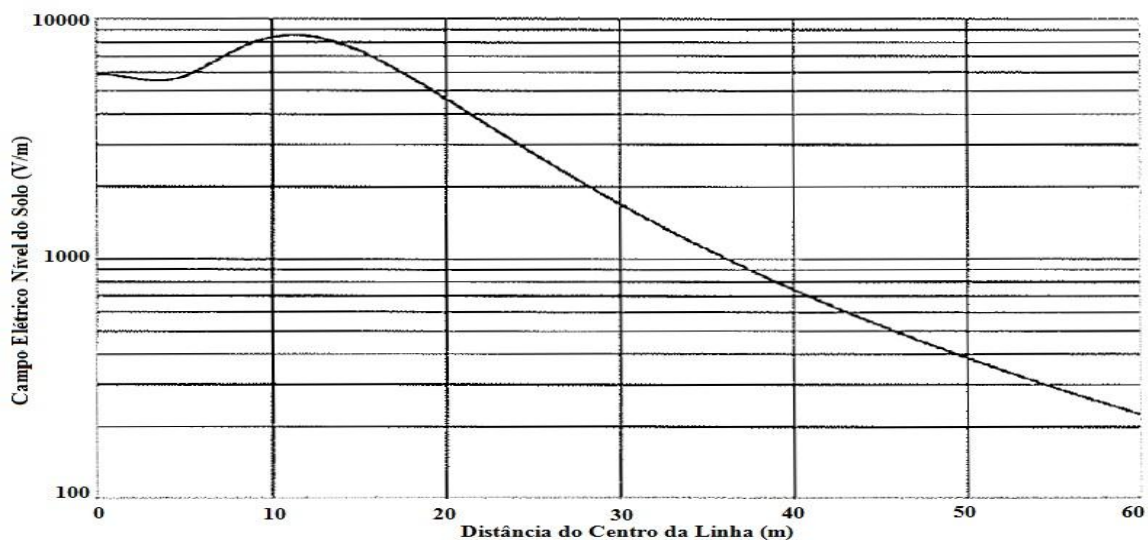


Figura 10 – Cálculo do Perfil Lateral de Campo Elétrico
 Fonte: (EPRI, 2005)

Analisando-se os gráficos das Fig. 9 e Fig. 10, percebe-se uma forte verossimilhança entre suas respectivas curvas.

Após comprovar os cálculos do perfil lateral de campo elétrico de uma linha de transmissão, insere-se um novo gráfico com imagem em 3D. Este novo gráfico permite obter o mapeamento total da linha de transmissão ao longo da sua extensão.

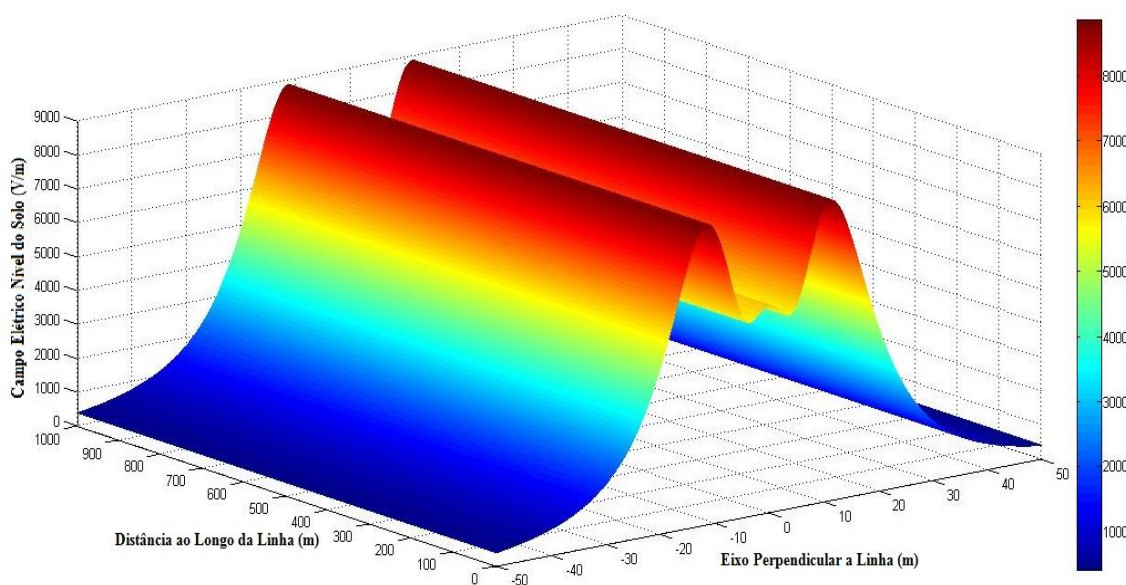


Figura 11 – Gráfico 3D Campo Elétrico ao Nível do Solo

5.4 Fluxograma de Cálculo de Campo Magnético

O algoritmo básico de cálculo do campo magnético está descrito na Fig. 12.

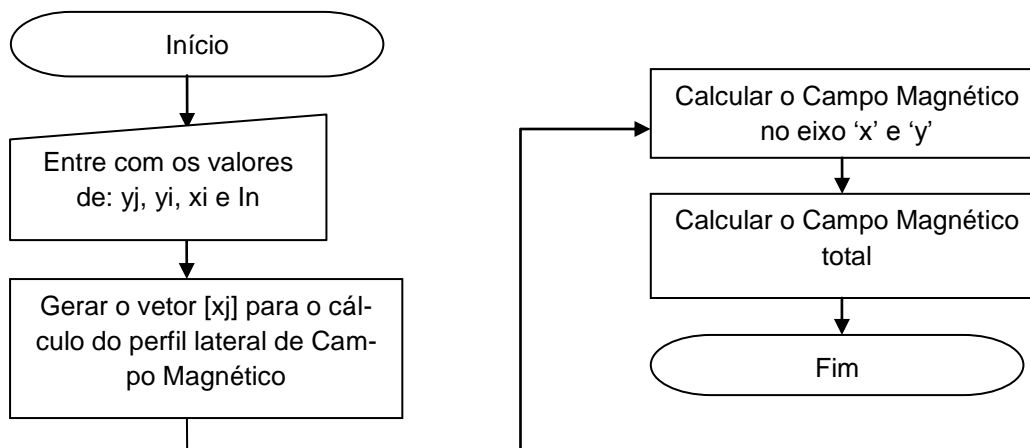


Figura 12 – Fluxograma de Cálculo do Campo Magnético

5.5 Validação – Método de Cálculo de Campo Magnético

Para a validação do cálculo de campo magnético de uma LT, a referência (EPRI, 2005) também é usada para esta verificação. Os dois gráficos apresentados são mostrados na Fig. 13, onde reproduz os resultados produzidos pelo desenvolvimento realizado neste trabalho, e Fig. 14, que apresenta os resultados tomados como referência. A Tabela 8 mostra os dados pertinentes à LT simulada.

Tabela 8 - Dados da LT para Cálculo do Campo Magnético

Configuração da LT	
Corrente de Operação (A)	1000
Espaçamento Entre Fases (m)	10
Altura dos Condutores ao Nível do Solo (m)	10,6
Cálculo Realizado Acima do Nível do Solo (m)	1
Número de Fases	3
Configuração	Horizontal

Fonte: (EPRI, 2005)

O gráfico da Fig. 13 a seguir, corresponde ao cálculo programado em plataforma Matlab® para o perfil lateral de campo magnético da LT, visualizado em 2D.



Figura 13 - Perfil Lateral do Campo Magnético Calculado

O gráfico da Fig. 14 corresponde ao perfil lateral de campo magnético da LT para efeito de comparação e validação do cálculo realizado e exposto os seus resultados na Fig. 13.

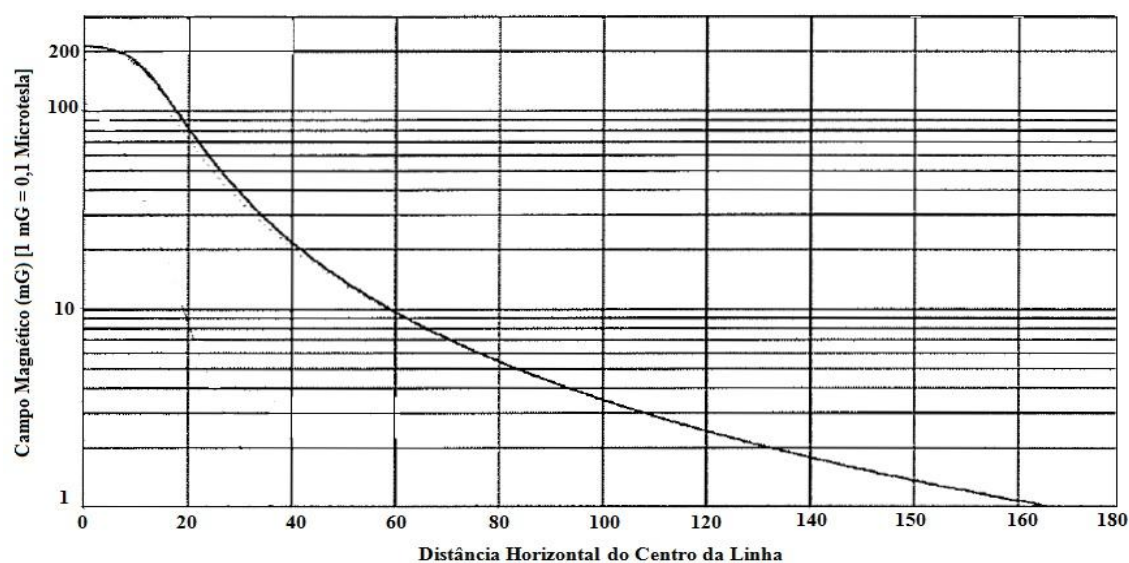


Figura 14 - Perfil Lateral do Campo Magnético
Fonte: (EPRI, 2005)

Analisando-se os gráficos das Figs. 13 e 14, percebe-se uma forte congruência entre suas respectivas curvas.

Depois de ter comprovado a conformidade dos cálculos para o perfil lateral de campo magnético de uma LT, pode-se inserir o gráfico 3D. O gráfico permite obter o ma-

peamento total do campo magnético da linha de transmissão resultando em uma melhor visualização dos valores ponto a ponto.

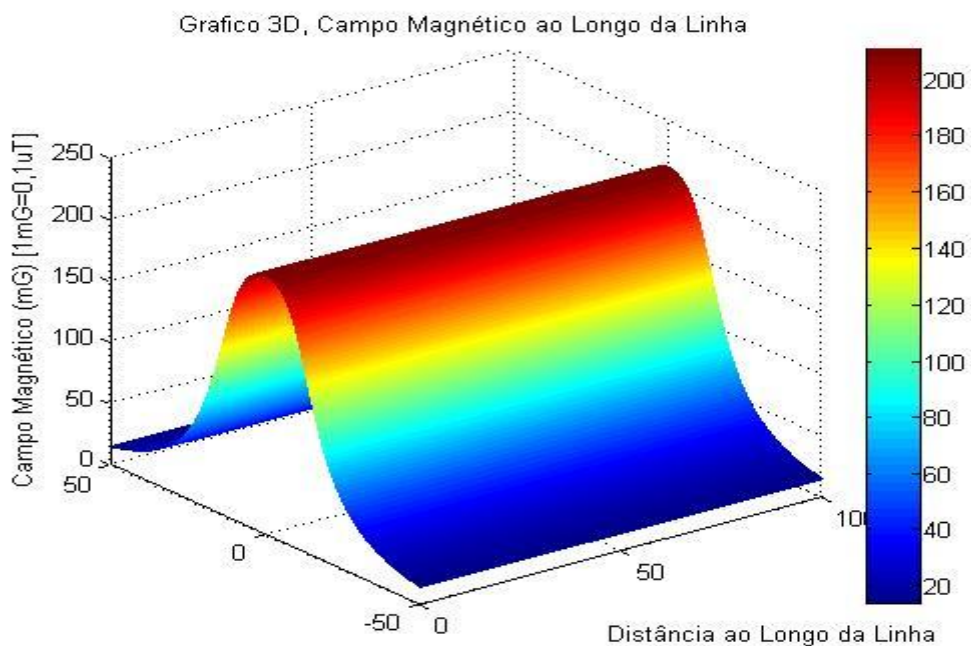


Figura 15 - Gráfico 3D Campo Magnético a 1 m do Nível do Solo

5.6 Fluxograma de Cálculo do Gradiente de Potencial

O fluxograma de cálculo do gradiente de potencial está descrito na Fig. 16.

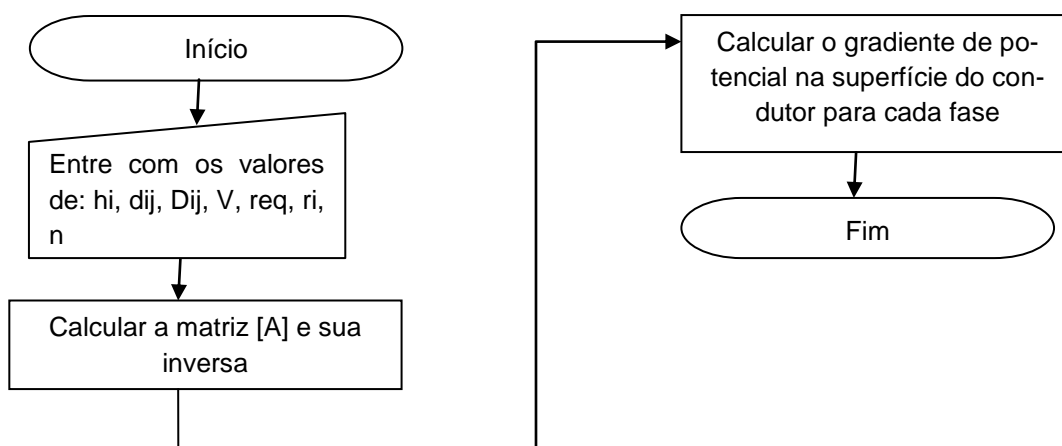


Figura 16 – Fluxograma de Cálculo do Gradiente de Potencial

5.7 Validação – Método de Cálculo do Gradiente de Potencial

A referência (IEEE COMMITTEE REPORT, 1979), é usada para a validação do cálculo do gradiente de potencial na superfície do condutor de uma LT. Tomou-se a configuração número 5 da referência mencionada para realizar a validação, cujas características principais são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados da LT para Cálculo do Gradiente de Potencial Superfície do Condutor

Configuração da LT	
Tensão de Operação (kV)	500
Espaçamento Entre Fases (m)	12,19
Altura dos Condutores (m)	14,43
Número de Condutores por Fase	3
Número de Fases	3
Espaçamento Entre Subcondutores (cm)	45,72
Diâmetro do Condutor (cm)	2,959
Configuração	Horizontal

Fonte: (IEEE COMMITTEE REPORT, 1979)

Dos vários métodos adotados para o cálculo do gradiente de potencial na superfície do condutor para esta configuração e considerados na referência (IEEE COMMITTEE REPORT, 1979), o método de Markt & Mengele bem como o método das Sucessivas Imagens são tomados como referência para a validação do cálculo desenvolvido neste trabalho.

Tabela 10 - Validação do Cálculo de Gradiente de Potencial na Superfície do Condutor

Gradiente de Potencial Médio nos Condutores	Markt & Mengele (Referência) (kV/cm)	Método de Cálculo do Trabalho (kV/cm)	$\Delta\%$ (Erro Relativo Percentual)	Método das Sucessivas Imagens (kV/cm)	Método de Cálculo do Trabalho (kV/cm)	$\Delta\%$ (Erro Relativo Percentual)
Fase Externa	14,15	14,12	0,21%	14,21	14,12	0,63%
Fase Central	15,22	15,19	0,18%	15,23	15,19	0,26%

De acordo com a Tabela 10, tem-se para o método adotado de cálculo, valores bem próximos em relação aos métodos usados na referência. Portanto, pode-se considerar válida a rotina implementada em plataforma MATLAB® para o cálculo do gradiente de potencial na superfície do condutor.

5.8 Fluxograma de Cálculo de Ruído Audível

O fluxograma básico de cálculo de ruído audível está descrito na Fig. 17.

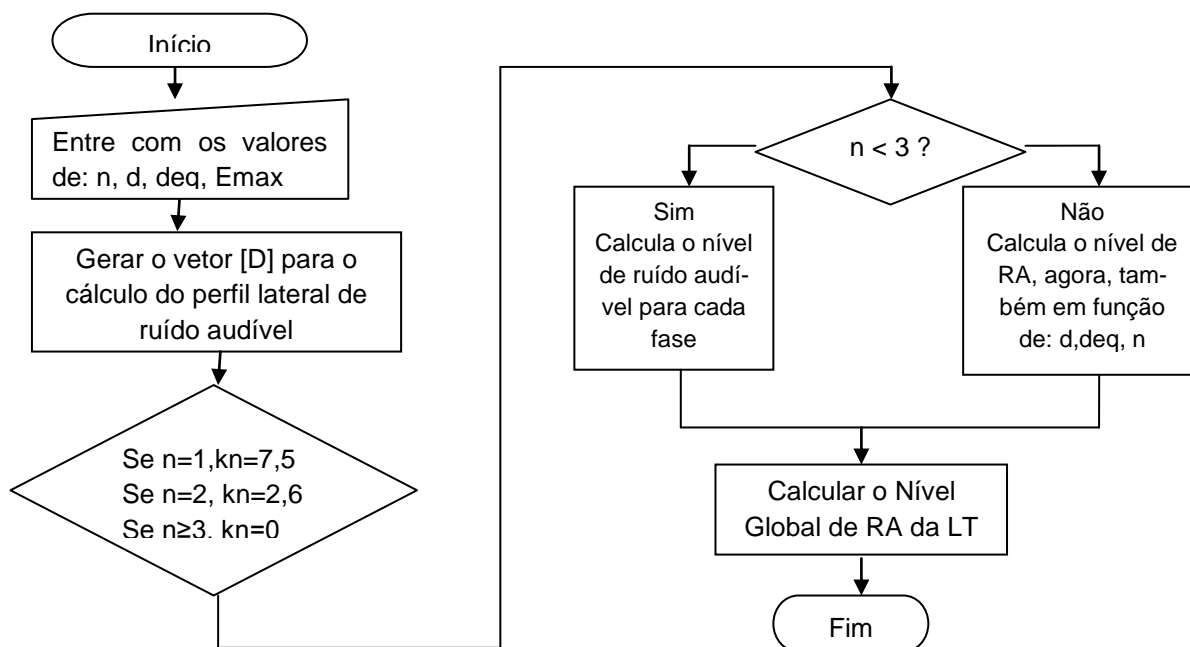


Figura 17 – Fluxograma de Cálculo do Ruído Audível

5.9 Validação – Método de Cálculo de Ruído Audível

Para a validação dos resultados de ruído audível provenientes de uma LT, a condição de condutor molhado (L_{50}) é considerada. Os resultados tomados por referência são os apresentados em (EPRI, 2005). O método de referência usado para a validação é o 'BPA Lexington Ross' de 'Charlier e Stearns'. A configuração da LT para validação está presente na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados da LT para Cálculo do Ruído Audível (L_{50})

Configuração da LT	
Tensão de Operação (kV)	240
Espaçamento Entre Fases (m)	8,20
Altura dos Condutores (m)	12,20
Número de Condutores por Fase	1
Número de Fases	3
Configuração	Horizontal
Diâmetro do Condutor (cm)	2,81
Distância da Fase mais Externa ao Ponto de Medida (m)	15

Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12 - Validação dos Valores de Ruído Audível

Método de Cálculo	Ruído Audível (L_{50}) dBA
BPA	40,52
Cálculo Programado	39,61
Erro Relativo Percentual (%)	2,24

Portanto, de acordo com a Tabela 12, pode-se considerar válida a rotina desenvolvida, pois apresenta um erro relativo percentual 2,24% em relação à referência.

5.10 Fluxograma de Cálculo de Rádio Interferência

O algoritmo básico de cálculo da rádio interferência é visualizado na Fig. 18.

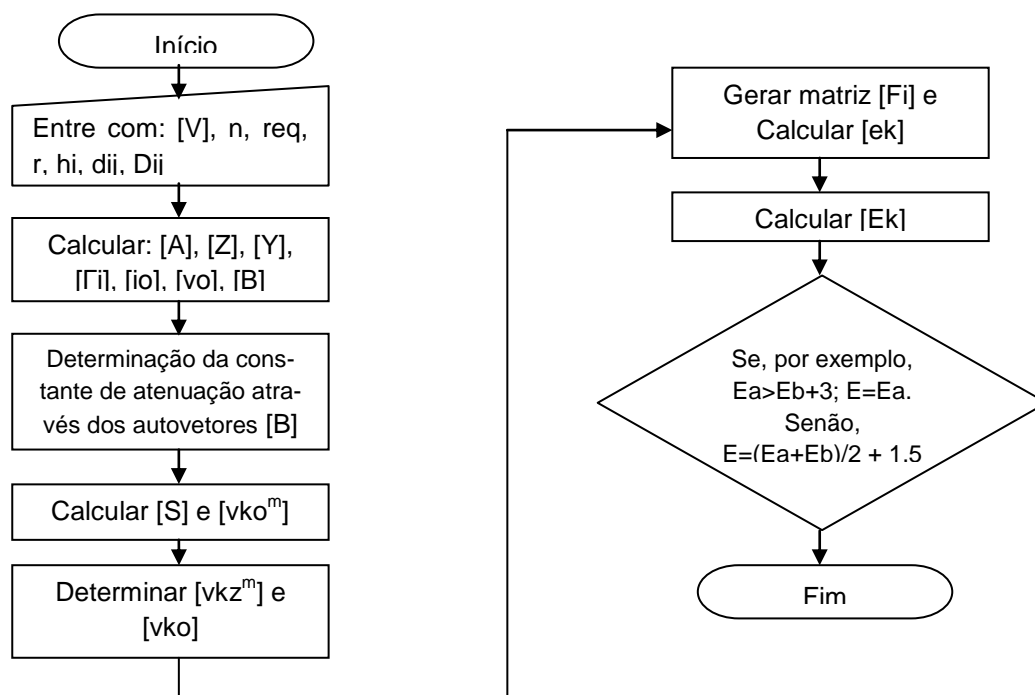


Figura 18 – Fluxograma de Cálculo de Rádio Interferência

5.11 Validação – Método de Cálculo de Rádio Interferência

Os resultados de cálculo de RI produzidos pelo algoritmo implementado neste trabalho são comparados aos resultados registrados na referência (JUETTE, 1973). O artigo, já citado no capítulo 2, calcula e faz medições de rádio interferência de várias configurações de linhas de transmissão. Para a validação, os valores medidos pre-

sente neste artigo são usados. A configuração da LT tomada como referência pode ser visualizada na Tabela 13.

Tabela 13 – Configuração da LT

Configuração da LT	
Tensão de Operação (kV)	400
Espaçamento Entre Fases (m)	9,60
Altura dos Condutores (m)	14,00
Número de Subcondutores por Fase	1
Número de Fases	3
Configuração	Horizontal
Diâmetro do Condutor (cm)	5,00

O nível de rádio interferência proveniente de uma LT é tomado a 15 metros de distância da fase mais externa. Para o seu cálculo, usa-se o método analítico, descrito na subseção 4.4.2 do Capítulo 4. Para a condição climática, considera-se a condição de chuva forte (L_5) para a validação dos resultados conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14 - Validação do Cálculo de Rádio Interferência (L_5)

Condições do Tempo	Método de Cálculo (dB)	Valor Medido Referência (dB)	Erro Relativo Percentual (%)
Chuva Forte	62,07	65	4,5

De acordo com a Tabela 14, percebe-se uma grande aproximação do valor medido em (JUETTE, 1973), com o valor calculado neste estudo, o que permite validar o método de cálculo desenvolvido.

5.12 Análise da Faixa de Segurança da Linha de Transmissão

A determinação da largura da faixa de segurança de uma LT parte da determinação de um parâmetro mecânico. Primeiramente, fazem-se as devidas considerações do balanço dos cabos condutores devido à ação do vento. Posteriormente, uma vez conhecida a largura da faixa de segurança definida pelo balanço dos cabos condutores, procede-se a análise dos parâmetros elétricos, estudados neste trabalho.

Os parâmetros elétricos devem estar com os seus valores permitidos para a faixa de segurança determinada. Caso estes valores estejam adequados, a faixa de segurança da LT continua com o valor determinado pelo balanço dos condutores. Por

outro lado, caso os valores dos parâmetros elétricos estejam acima do permitido, a faixa de segurança deverá ser corrigida para que nenhum valor esteja acima do permitido para esta distância.

A referência (NBR 5422, 1985) é uma norma em que as condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica são fixadas. A norma, publicada em 1985 e ainda hoje em vigor, recomenda o cálculo da largura de faixa de segurança (L) devido ao balanço dos cabos condutores como sendo definida através da seguinte equação:

$$L = 2.(b + d + D) \quad (5.1)$$

Sendo:

L – largura da faixa de segurança, em metros.

b – distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado deste eixo, em metros.

d – soma das projeções horizontais da flecha do condutor e do comprimento da cadeia de isoladores, em metros, após seu deslocamento angular (β) devido à ação do vento.

D – distância de segurança, em metros.

A Fig. 19 ilustra as distâncias envolvidas no cálculo da largura da faixa de segurança devido ao balanço dos cabos condutores.

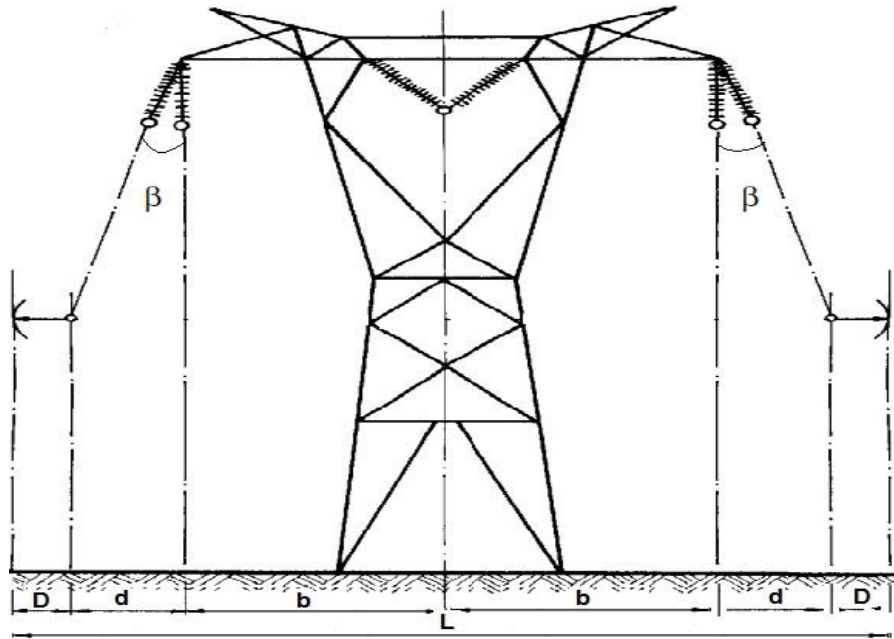


Figura 19 - Distâncias Envolvidas para o Cálculo da Largura Faixa de Segurança

A distância de segurança (D) pode ser determinada por:

$$D = \frac{V_{\text{nominal}}}{150}, \text{ mínimo igual a } 0,5 \text{ [m]}. \quad (5.2)$$

Para a soma das projeções horizontais da flecha do condutor e do comprimento da cadeia de isolador (d), tem-se:

$$d = (F+l) \cdot \text{sen}.\beta \quad (5.3)$$

Onde:

F – Flecha do cabo condutor para vão, em metros.

l – Comprimento da cadeia de isoladores e ferragens, em metros.

B - Ângulo de balanço do condutor e da cadeia.

O ângulo de balanço da cadeia de isoladores devido à ação do vento pode ser calculado por:

$$\beta = \arctan \left[\frac{k \cdot q_0 \cdot d}{p \cdot \left(\frac{V}{H} \right)} \right] \quad (5.4)$$

Sendo:

d – diâmetro do condutor, [m].

p – peso unitário do condutor, [kgf/m].

V/H – relação vão de peso/vão de vento.

q₀ – pressão dinâmica de referência, [N/m²].

k – valor retirado da Fig. 20.

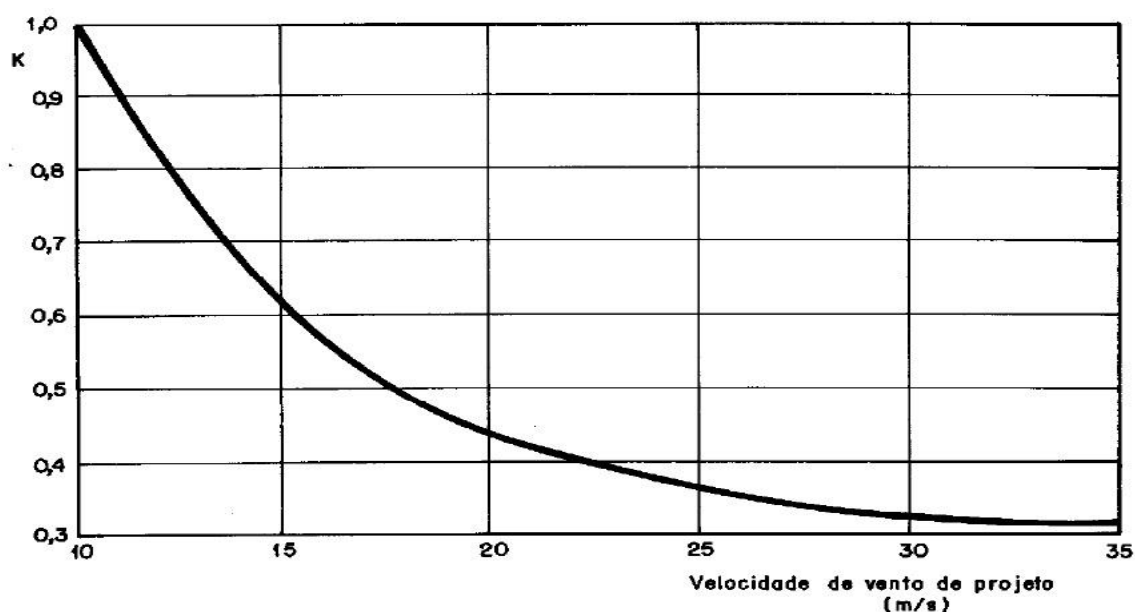


Figura 20 - Parâmetro Para Determinação Do Ângulo De Balanço
Fonte: (NBR 5422, 1985)

A pressão dinâmica de referência pode ser calculada por:

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1,293}{1+0,00367 \cdot t} \right) \cdot \left(\frac{1600+64 \cdot t - Alt}{1600+64 \cdot t + Alt} \right) \cdot V_p^2 \quad (5.5)$$

t – Temperatura [°C].

Alt – Altitude média da região de implantação da linha, [m].

V_p – Velocidade do vento de projeto, [m/s].

A velocidade do vento de projeto (V_p) pode ser determinada a partir da velocidade básica do vento (V_b) corrigida. A velocidade básica do vento (V_b) é referida a um período de retorno de 50 anos, a 10 metros de altura do solo, com período de inte-

gração de 10 minutos em um terreno com grau de rugosidade B. A velocidade básica pode ser visualizada no mapa mostrado na Fig. 21.

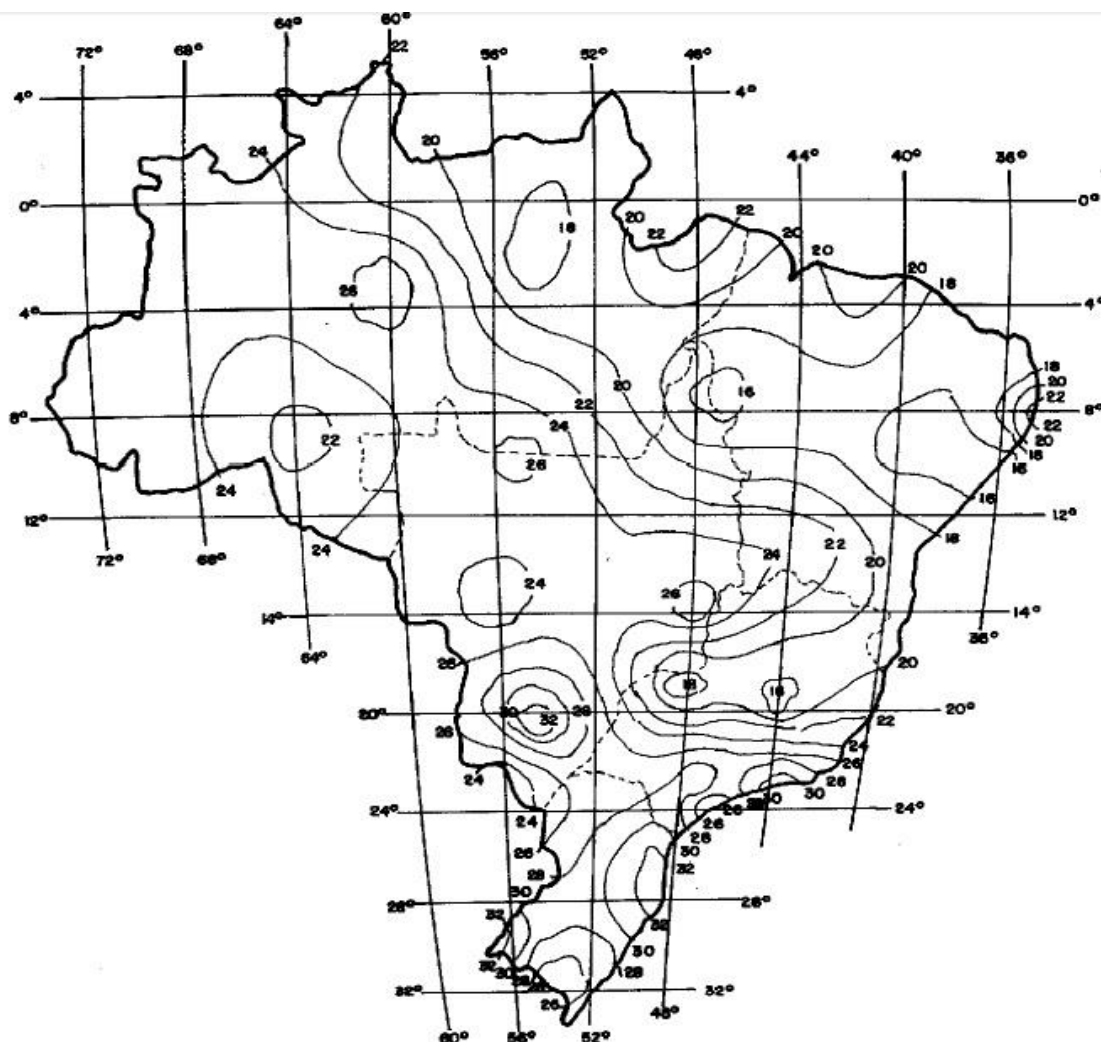


Figura 21 - Velocidade Básica do Vento
 Fonte: (NBR 5422, 1985)

A velocidade básico do vento corrigida, leva em conta o grau de rugosidade da região de implantação da linha, o intervalo de tempo necessário para que o obstáculo responda à ação do vento, a altura do obstáculo e o período de retorno adotado.

Para a correção de rugosidade, 4 categorias de terreno são definidos, sendo os seus respectivos coeficientes apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Coeficientes de acordo com a Categoria do Terreno

Categoria do Terreno	Características do Terreno	Coefficiente de Rugosidade k_r
A	Vastas extensões de água, áreas planas costeiras, desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos Obstáculos	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0,85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas	0,67

Fonte: (NBR 5422, 1985)

Para a correção do período de integração, a Fig. 22 apresenta a relação 'kd' entre os valores médios de ventos a 10 metros de altura do solo, para diferentes períodos de integração e rugosidades do terreno.

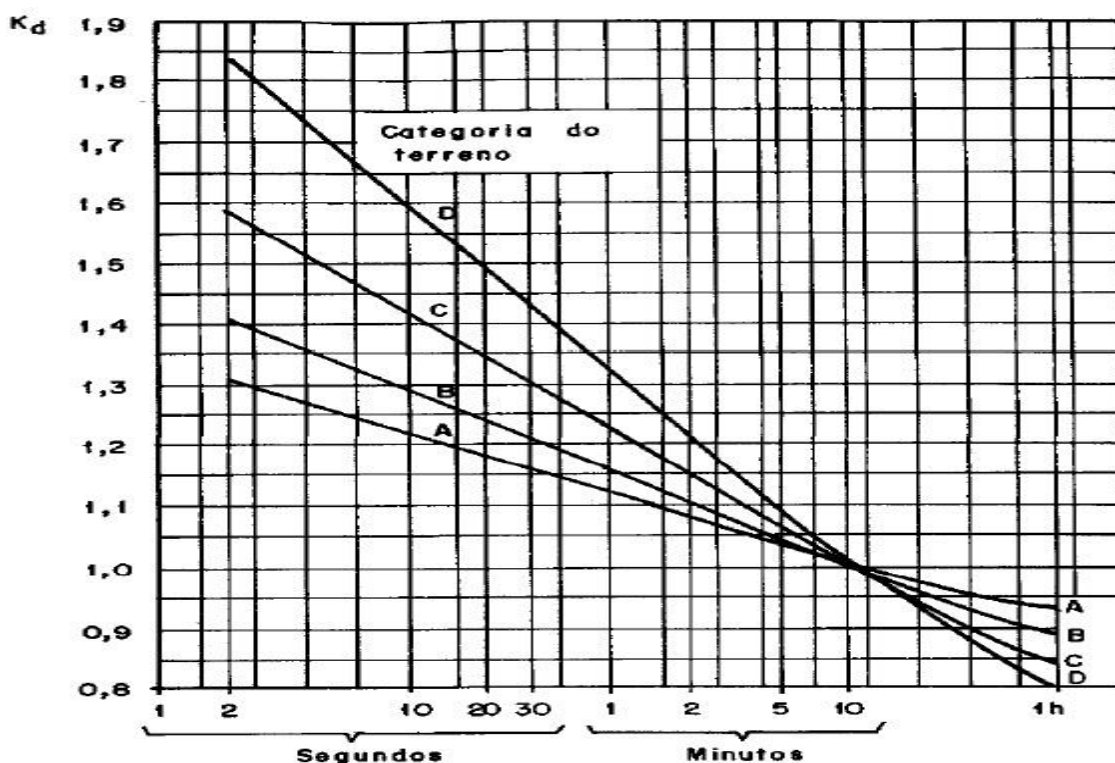


Figura 22 - Correção do Período de Integração

Fonte: (NBR 5422, 1985)

A correção da velocidade do vento para alturas diferentes pode ser conhecida empregando a seguinte equação:

$$V_H = V_{10} \left(\frac{H}{10} \right)^{1/n} \quad (5.6)$$

sendo:

H - a altura de atuação do vento.

V_{10} - velocidade do vento a 10 metros de altura.

O coeficiente 'n' depende da rugosidade do terreno e do período de integração t. A Tabela 16 apresentada em seguida resume tal influência.

Tabela 16 - Valores de n para Correção da Velocidade do Vento em Função da Altura

Categoria do Terreno	n	
	t = 2 seg	t = 30 seg
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

Fonte: (NBR 5422, 1985)

Os valores de velocidade básica (V_b) descrito na Fig. 21 referem-se a um período de retorno de 50 anos. A sua correção (V_T), para outros valores, pode ser dado por:

$$V_T = \dot{B} - \ln \frac{[-\ln(1-\frac{1}{T})]}{\hat{a}} \quad (5.7)$$

$\hat{\alpha}$ – estimador do fator de escala da distribuição de Gumbel, obtido pela Fig 23.

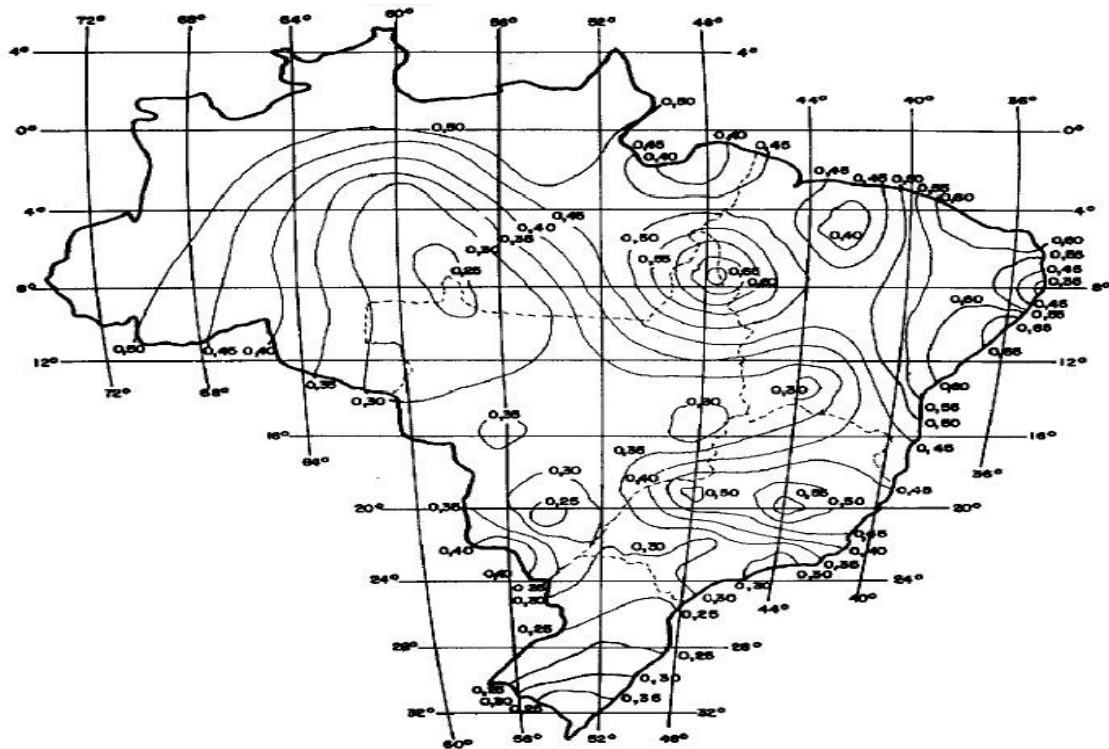


Figura 23 - Parâmetro $\hat{\alpha}$ da Distribuição Estatística de Gumbel
Fonte: (NBR 5422, 1985)

\hat{B} - estimador do fator de distribuição de Gumbel, obtido pela Fig. 24.

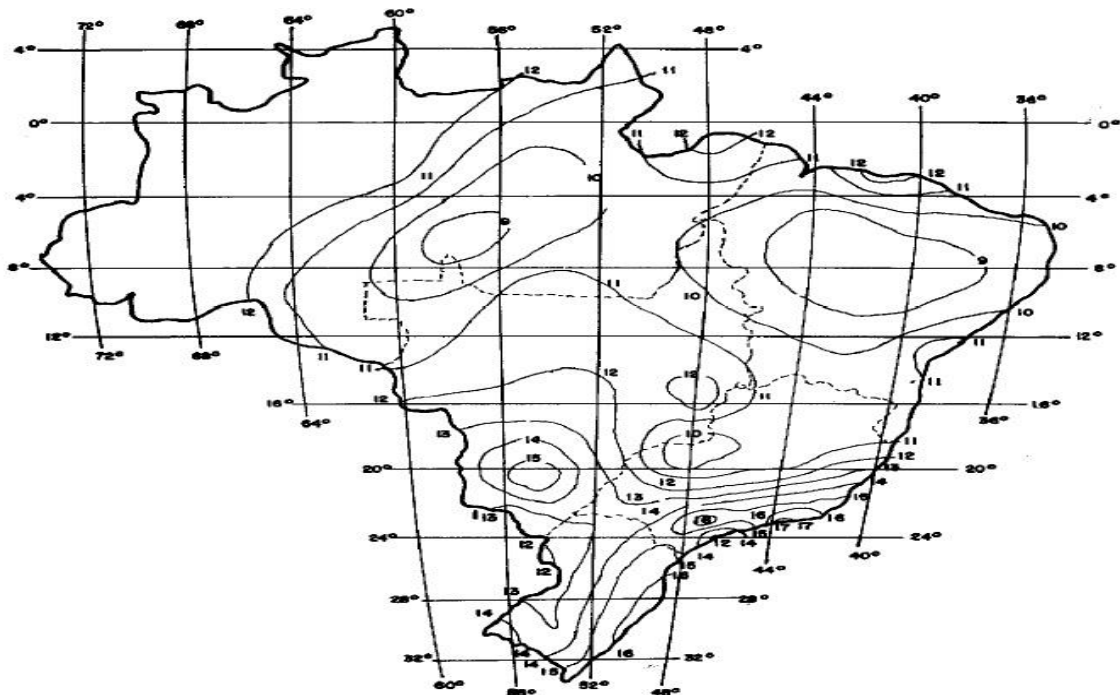


Figura 24 Parâmetro \hat{B} da Distribuição Estatística de Gumbel
Fonte: (NBR 5422, 1985)

Finalmente, combinando-se todas as correções citadas acima, pode-se obter a velocidade do vento de projeto (V_p) pela seguinte equação:

$$V_p = kr \cdot kd \cdot VT \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{1/n} \quad (5.8)$$

5.13 Estudo de Caso – Largura Faixa de Segurança LT

Diante dos estudos de campo magnético, campo elétrico, gradiente de potencial na superfície do condutor, ruído audível, rádio interferência, incluindo os balanços dos condutores devido à velocidade do vento no cálculo da largura da faixa de segurança, tem-se, agora a necessidade de se fazer um estudo de caso de uma LT que sirva de base para inserir todos estes cálculos desenvolvidos ao longo deste trabalho.

O caso base contempla a análise de uma LT em configuração horizontal cujas características são registradas na Tabela 17.

Tabela 17 - Configuração LT Caso Base

Configuração LT Caso Base	
Tensão (kV)	230
Corrente (A)	500
Altura dos Condutores (m)	25
Mínima Altura dos Condutores ao Solo (m)	8
Flecha do Cabo Condutor (m)	17
Tipo do Condutor	Grosbeak 636 MCM
Número de Subcondutores por Fase	1
Espaçamento Entre Subcondutores (m)	0,457
Distância Entre Fases Adjacentes (m)	8,2
Comprimento da Cadeia de Isoladores e ferragens (m)	2,7
Velocidade do Vento de Projeto (m/s)	42,3
Pressão Dinâmica de Referência (kg/m ²)	109
Relação(Vão de Peso/Vão de Vento) Típico	0,7

A análise começa pela definição da largura da faixa de segurança calculada pelo balanço dos cabos condutores. Portanto, através dos dados disponibilizados pela Tabela 17, tem-se para a largura da faixa de segurança o valor igual a:

L = 50 metros

Agora, tem-se a necessidade de avaliar se os parâmetros elétricos estão em conformidade com os valores correspondentes permitidos ao longo desta faixa de segurança calculada.

Primeiramente, efetuam-se os cálculos dos campos elétricos e magnéticos desta linha de transmissão. Os cálculos consideram uma distância a 1,5 metros do nível do solo com uma altura mínima dos condutores ao solo definida de acordo com a Tabela 17. Estes procedimentos, bem como os valores limítrofes de campo elétrico e magnético estão presentes na referência (ANEEL, 2010).

O perfil lateral de campo elétrico é apresentado na Fig. 25.

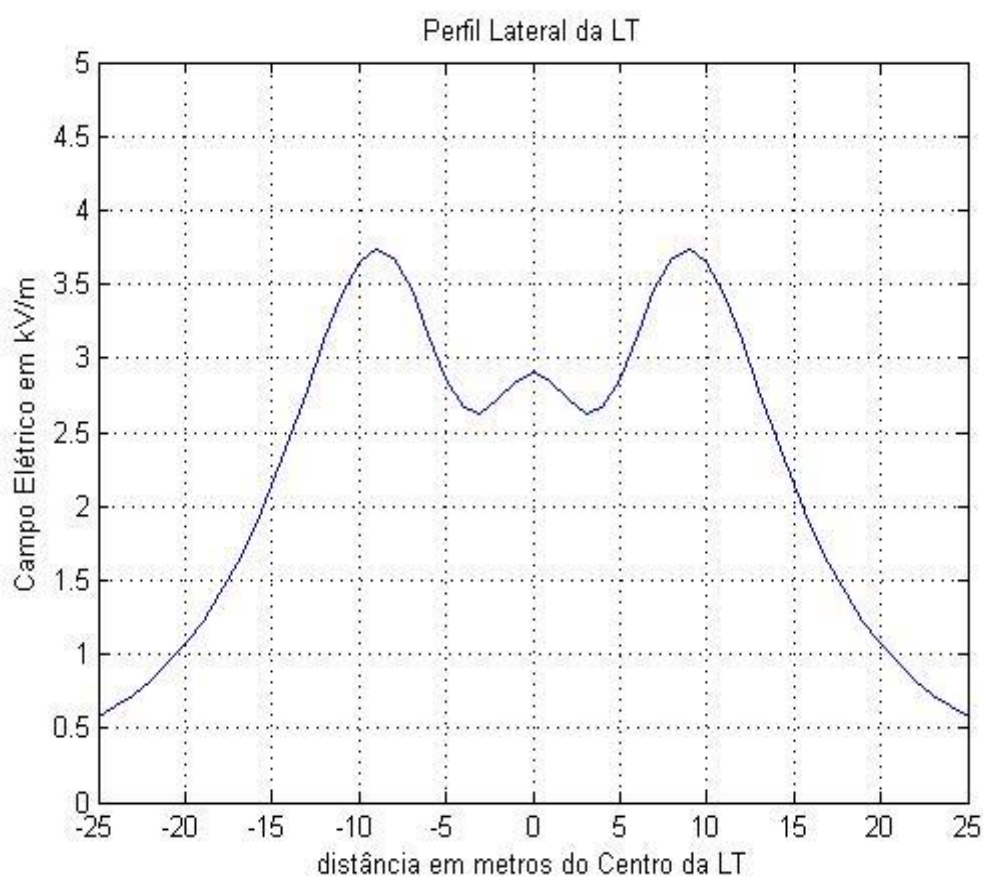


Figura 25 - Perfil Lateral de Campo Elétrico do Caso Base

De acordo com a Fig. 25, no limite da faixa de segurança, tem-se um campo igual a 0,57 [kV/m]. Para a população em geral, este valor está abaixo do nível máximo permitido de 4,17 [kV/m]. No interior da faixa de segurança, tem-se um nível no valor

de 3,74 [kV/m]. Para a população ocupacional, o valor também está abaixo do máximo permitido que é de 8,33 [kV/m].

Por sua vez, o perfil lateral de campo magnético é mostrado na Fig. 26.

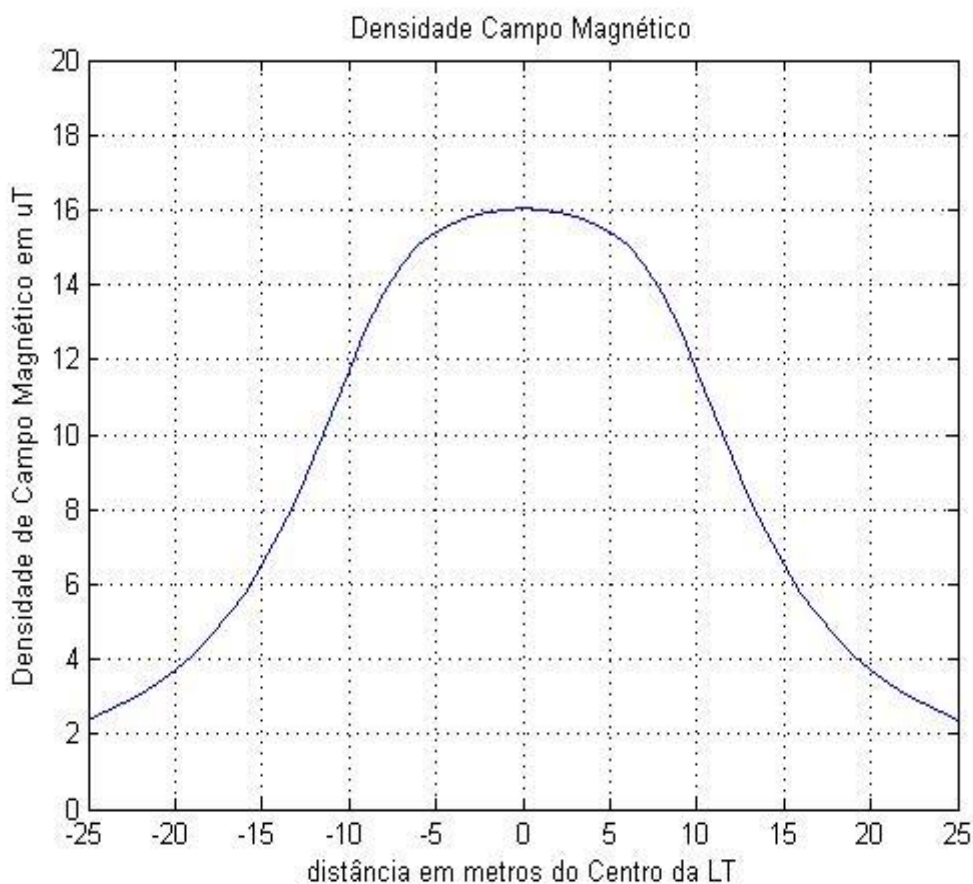


Figura 26- Perfil Lateral do Campo Magnético do Caso Base

De acordo com a Fig. 26, tem-se que no limite da faixa de segurança, o valor de campo magnético é de 2,37 [μ T]. Este valor é bem inferior em comparação com o permitido por norma para a população em geral, ou seja, 83,33 [μ T]. Para a população ocupacional, o maior valor de campo magnético para esta linha é de 16,04 [μ T]. Também, tal valor resulta bem abaixo do permitido em norma, isto é, 416,67 [μ T].

Os valores de rádio interferência em um eixo transversal às linhas de transmissão dados em função de tempo bom (Fair L50) são mostrados na Fig. 27.

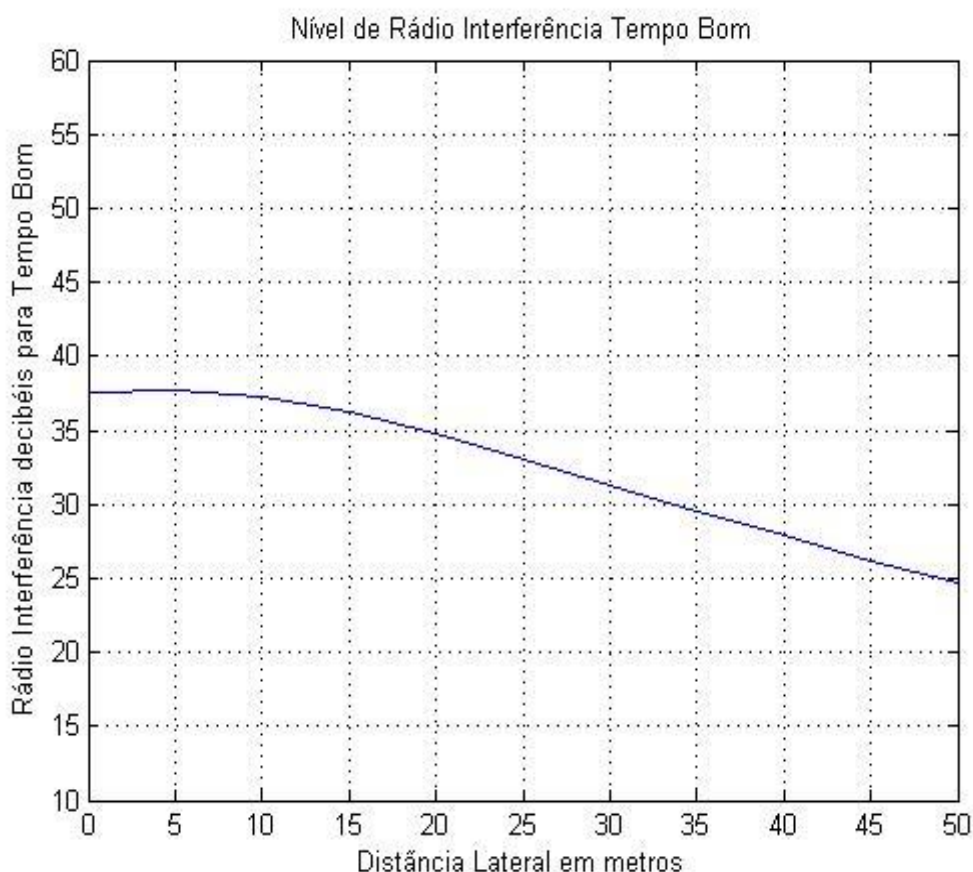


Figura 27- Valores de Rádio Interferência para um Perfil lateral da LT (Fair L50)

De acordo com a Fig. 27, pode-se obter um valor de 33,09 [dB] para o nível de rádio interferência proveniente da LT do caso base no limite da faixa de segurança (25 metros). O valor de RI constatado no limite da faixa de segurança com 50% de probabilidade de não ser excedido, considerando-se o tempo todo do ano, atende o critério máximo de 42 [dB].

Para o ruído audível proveniente da linha de transmissão do caso base, faz-se sua análise de acordo com os resultados provenientes da condição de condutor molhado (L_{50}). A Fig. 28 mostra os valores do nível de ruído audível do perfil lateral provenientes da LT do caso base.

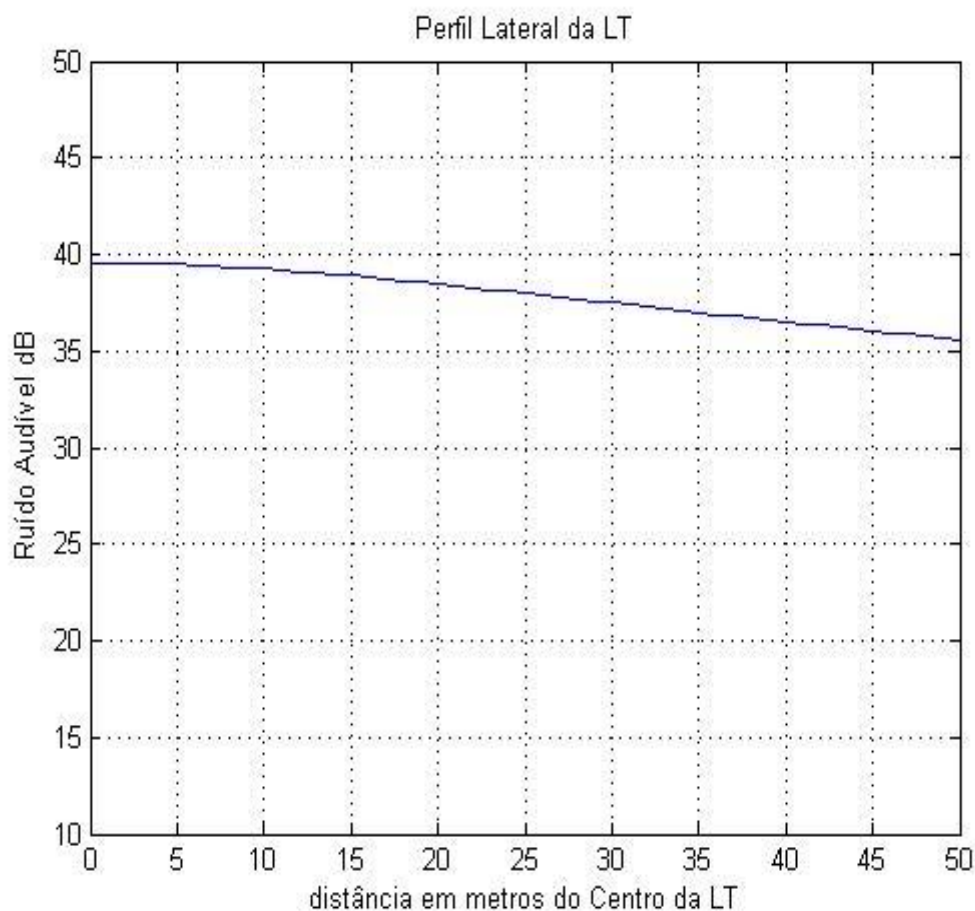


Figura 28- Valores de Ruído Audível para Condição Condutor Molhado (L_{50})

De acordo com a Fig. 28, tem-se um valor de 37,98 [dB] do nível de ruído audível emitido pela LT na condição de condutor molhado (L_{50}). Este ponto corresponde no eixo da abscissa um valor de 25 metros que é o limite da faixa de segurança da LT. De acordo com a ONS, o valor máximo no limite da faixa de segurança deve ser de 58 [dB]. Portanto, para esta LT, a condição de ruído audível está dentro do esperado.

5.14 Considerações Finais

Neste capítulo, são demonstrados todos os cálculos referentes aos parâmetros elétricos estudados em capítulos anteriores através das suas respectivas rotinas de cálculos. Também, a largura da faixa de segurança de uma linha de transmissão é analisada. Nesta análise, é demonstrada a maneira de cálculo desta faixa. Na maio-

ria dos projetos de largura da faixa de segurança é utilizado o nível de tensão da LT, fazendo com que em muitas vezes a largura de faixa resulte subdimensionada ou superdimensionada. Portanto, é necessário calcular a faixa de segurança de uma LT de acordo com suas particularidades e, posteriormente, efetuar a constatação se os parâmetros elétricos estão com os seus níveis aceitáveis em relação a largura de faixa definida.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos

6.1 Considerações Gerais

Depois da publicação da Resolução Normativa N° 398, de 23 de março de 2010, no qual regulamenta a Lei N°11934, houve certa mobilização das empresas responsáveis pelos projetos de linhas de transmissão no cálculo dos níveis de campos elétricos e magnéticos. Estes níveis devem estar de acordo com a resolução citada.

Neste trabalho, os campos elétrico e magnético são descritos e são implementadas suas respectivas rotinas de cálculo na plataforma MATLAB®. No entanto, não somente os níveis de campo elétrico e magnético são suficientes na análise dos efeitos eletromagnéticos provenientes das linhas aéreas de transmissão.

Também, a análise de ruído audível e rádio interferência devem ser procedidas. Suas definições e respectivas rotinas de cálculo são desenvolvidas. Para estes parâmetros, diante do caso base analisado, seus respectivos níveis atingiram patamares bem próximos aos valores limites na faixa de segurança da LT, face às suas normas restritivas, quando comparado com os níveis de campo elétrico e magnético. As análises de ruído audível e rádio interferência, portanto, são totalmente necessárias na faixa de segurança de uma LT.

A faixa de segurança de uma LT é determinada através de (NBR 5422, 1985). Através desta norma é possível calcular a faixa de segurança de uma LT através de um parâmetro mecânico (balanços dos condutores). Depois de determinada esta faixa, faz-se necessário analisar se os parâmetros elétricos (campo elétrico, campo magnético, ruído audível, rádio interferência) estão com os seus níveis permitidos, no limite da faixa de segurança em relação às suas devidas normas.

Quando o projetista analisa a faixa de segurança de uma LT através do seu respectivo nível de tensão, tem-se a tendência desta faixa ficar subdimensionado ou superdimensionado. Portanto, o roteiro descrito nesta dissertação considera o parâmetro mecânico no cálculo da faixa de segurança da LT como forma de evitar o seu mau dimensionamento.

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Implementando-se parques geradores distante dos centros consumidores, tem-se a necessidade de avaliar qual tipo de linha de transmissão, AC ou DC, é mais adequada. Para o transporte de grandes blocos de energia a uma longa distância, a construção de linhas DC é mais vantajosa. No Brasil existem projetos para a construção de linhas em corrente contínua, como por exemplo, a linha que vai escoar a energia da usina de Belo Monte na tensão de 800 kV DC. Portanto, como neste trabalho são estudadas somente linhas de transmissão em corrente alternada, pode ser conveniente fazer um levantamento bibliográfico sobre as características das linhas DC. Posteriormente, comparar as propriedades de campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência das linhas DC em relação às linhas AC para o transporte da mesma quantidade de energia.

Também, de acordo com a revisão bibliográfica feito no capítulo 2 deste trabalho, são constatadas várias opções de métodos de cálculos de campos elétricos, campos magnéticos, gradiente de potencial na superfície do condutor, ruído audível e rádio interferência. Diante deste grande número de métodos, pode ser conveniente analisar os diferentes métodos de cada efeito eletromagnético e compará-los em relação aos valores medidos. Assim, o método que se aproximasse mais do valor medido, é o método mais adequado para o cálculo do respectivo parâmetro elétrico.

Finalmente, para linhas de transmissão em operação há bastante tempo, ou mesmo subestações que concentram grande quantidade de circuitos e equipamentos, pode ser interessante analisar e avaliar as intensidades somadas dos efeitos eletromagnéticos em conjunto com a sua faixa de segurança ou área de instalação, conforme o caso. Muitas concessionárias ou proprietários destes ativos projetaram a LT ou subestação de acordo com o seu respectivo nível de tensão, tendo como referência a sua operação individualizada. Tal prática permite adequar o projeto às restrições

impostas em norma. No entanto, as faixas de segurança bem como as subestações que concentram grande quantidade de circuitos e equipamento de alta-tensão e, conseqüentemente, elevada densidade de energia por m^2 , podem representar instalações em que os limites estabelecidos em norma sejam amplamente violados. Um estudo mais rigoroso poderia ser realizado para aferir e atualizar os valores devidos.

Referências Bibliográficas

ABDEL-SALAM, M.; ABO-SHAL, Y. Onset voltage of corona on coated conductors. **Industry Applications Conference IEEE,2.**, Orlando, 8-12 Outubro 1995. 1216-1222.

ADAMS, G. E. The Calculation of the Radio Interference Level of Transmission Lines Caused by Corona Discharges. **Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers,75 ,3**, Janeiro 1956.

AHLBOM, A.; DAY, N.; FEYCHTING. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. **British Journal of Cancer**, 2000.

ANDERSON, J. G.; BARETSKY, M.; MACCARTHY, D. D. Corona-Loss Characteristics of EHV Transmission Lines Based on Project EHV Research. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-85, 12**, Dezembro 1996. 1196 - 1212.

ANEEL. **Resolução Normativa N° 398**. [S.l.]. 2010.

ANSI/IEEE. **IEEE Standard for the Measurement of Audible Noise From Overhead Transmission Lines**. [S.l.]. 1985.

ANSI/IEEE. **IEEE Standard for the Measurement of Audible Noise From Overhead Transmission Lines**. Standard 656-1992. [S.l.]. 1992. (0-7381-0363-2).

ANSI/IEEE. **IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines**. [S.l.]. 1994. (0-7381-0362-4).

ATOIAN, G. E. Are There Biological and Psychological Effects Due to Extra High Voltage Installations? **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-97, 1**, Janeiro 1978. 8 - 18.

BIAN, X. et al. Influence of Aged Conductor Surface Conditions on AC Corona-Generated Audible Noise with a Corona Cage. **Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on,19,6**, Dezembro 2012. 2037 - 2043.

CARNEIRO, S.; JOSE, M. R. Evaluation of corona and line models in electromagnetic transients simulations. **Power Delivery, IEEE Transactions on, 6, 1**, Janeiro 1991. 334 - 342.

COMBER, M. G.; CORTINA, R. Audible noise generation of individual subconductors of transmission line conductor bundles. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on,95,2**, Março 1976. 525 - 535.

CRASSON, M. 50-60 Hz Electric and Magnetic Field Effects on Cognitive Function: a Review. **Radiat Prot Dosimetry**, 2003. 333-340.

DENO, D. W. Transmission Line Fields. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transaction on**, **95,5**, October 1976. 1600-1611.

DIMBYLOW, P. J. Development of the Female Voxel Phantom, Naomi and its Application to Calculations of Induced Current Densities and Electric Fields From Applied Low Frequency Magnetic and Electric Fields. **Physics in Medicine and Biology**, 2005. 1047 - 1050.

DIMBYLOW, P. J. Development of Pregnant Female, Hybrid Voxel-Mathematical Models and Their Application to the Dosimetry of Applied Magnetic and Electric Fields at 50 Hz. **Physics in Medicine and Biology**, 2006. 2383 - 2394.

EPRI. **Electrostatic and Electromagnetic Effects of Ultrahigh-Voltage Transmission Lines**. Palo Alto, California. 1978.

EPRI. **Transmission Line Reference Book - 345 kV and Above**. Second Edition. ed. California: Epr, Palo Alto, 1982.

EPRI. **AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above**. Third Edition. ed. California: EPRI, Palo Alto, 2005.

FILHO, M. L. P. Upgrading Urban High Voltage Transmission Line: Impact on Electric and Magnetic Fields in the Environment. **Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. IEEE/PES**, 8-11 Novembro 2004. 788 - 793.

FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica**. Itajubá: Livros Técnicos e Científicos, v. 2, 1977.

GARCÍA, A. M.; SISTERNAS, A.; HOYOS, S. P. Occupational Exposure to Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields and Alzheimer Disease: a Meta Analysis. **International Journal of Epidemiology**, **37, 2**, 2008. 329-340.

GARY, C.; DRAGAN, G.; CRITESCU, D. Attenuation of Traveling Waves Caused by Corona. **Cigre**, 1978.

GOLDMAN, M.; SIGMOND, R. S. Corona and Insulation. **Electrical Insulation, IEEE Transactions on**, **EI-17,2**, Abril 1982. 90-105.

HEDMAN, D. E. Propagation on Overhead Transmission Lines I-Theory of Modal Analysis. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, **84, 3**, Março 1965. 200 - 205.

IARC. **IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields..** Lyon. 2002.

ICNIRC. **Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields.** [S.I.]. 1998.

ICNIRC. **ICNIRP GUIDELINES – For Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields.** [S.I.]. 2010.

IEEE. **IEEE Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines and Substations.** [S.I.], p. 1 - 21. 1986.

IEEE COMMITTEE REPORT. A Survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-98, 6**, Novembro 1979. 1996 - 2014.

IEEE COMMITTEE REPORT. A Comparison of Methods for Calculating Audible Noise of High Voltage Transmission Lines. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-101,10**, Outubro 1982. 4090 - 4099.

IYYUNI, G. B.; SEBO, S. A. Study of Transmission Line Magnetic Fields. **Power Symposium. Proceedings of the Twenty-Second Annual North American**, Auburn, 15 Outubro 1990. 222-231.

JACOBS, P. D.; DIETRICH, F. M. Measurements of Transmission Line Electric Fields in a Residential Environment. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-103, 8**, Agosto 1984. 2237-2243.

JUETTE, G. W. Comparison of Radio Noise Prediction Methods With CIGRE/IEEE Survey Results. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-92, 3**, Maio 1973. 1029 - 1042.

JUETTE, G. W. et al. CIGRE/IEEE Survey on Extra High Voltage Transmission Line Radio Noise. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-92,3**, Maio 1973. 1019 - 1028.

JUETTE, G. W.; ZAFFANELLA, L. E. Radio Noise, Audible Noise, and Corona Loss of EHV and UHV Transmission Lines Under Rain: Predetermination Based on Cage Tests. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-89, 6** , Julho 1970. 1168 - 1178.

KEAST, D. N. Assessing the Impact of Audible Noise From AC Transmission Lines: A Proposed Method. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-99,3**, Maio 1980. 1021 - 1031.

LAMBERT, E. G.; CHAIRMAN. Measurement of Electric and Magnetic Fields From Alternating Current Power Lines. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-97, 4** , Julho 1978. 1104 - 1114.

LI, Q. et al. On calculating surface potential gradient of overhead line conductors. **Electrical Insulation (ISEI). IEEE International Symposium on**, San Juan, 10-12 Junho 2012. 540 - 544.

LIU, J. et al. Electromagnetic Fields Near High Voltage Electrical Power Lines: A Parametric Analysis. **Power System Technology. Proceedings. PowerCon. International Conference on, 1**, 13-17 Outubro 2002. 401 - 408.

LIU, Y.; ZAFFANELLA, L. E. Calculation of electric field and audible noise from transmission lines with non-parallel conductors. **Power Delivery, IEEE Transactions on, 11, 3**, Julho 1996. 1492 - 1497.

MACHADO, V. G. et al. LT 500 kV Interligação Norte/Sul III - Trecho 2. Solução Estrutural com Torres Estaiada Monomastro e Feixe Expandido. **XIX SNPTEE**, Rio de Janeiro, 14-17 Outubro 2007.

MALIK, H. N. A review of the charge simulation method and its applications. **Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 24, 1** , Fevereiro 1989. 3 - 20.

MAMIS, M. S. State-Space Transient Analysis of Single - Phase Transmission Lines with Corona. **International Conference on Power System Transients**, New Orleans, 2003.

MAMISHEV, A. V.; NEVELS, R. D.; RUSSEL, B. D. Effects of Conductor Sag on Spatial Distribution of Power Line Magnetic Field. **Power Delivery, IEEE Transactions on, 11, 3** , Julho 1996. 1571 - 1576.

MCCANN, G. D. The Effect of Corona on Coupling Factors Between Ground Wires and Phase Conductors. **American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the, 62, 12**, Dezembro 1943. 818 - 826.

MICHAELIS, J.; SCHÜZ, J.; MEINERT, R. Childhood Leukemia and Electromagnetic Fields: results of a population based case-control study in Germany. **Cancer Causes Control**, 1997.

MOREAU, M. R.; GARY, C. H. Predetermination of the Radio-Interference Level of High Voltage Transmission Lines I - Predetermination of the Excitation Function. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-91, 1**, Janeiro 1972. 284 - 291.

NBR 15415. **Métodos de Medição e Níveis de Referência para Exposição a Campos Elétricos e Magnéticos na Frequência de 50 Hz e 60 Hz**. ABNT. [S.l.]. 2006.

NBR 5422. **Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**. ABNT. [S.l.]. 1985.

NEELAKANTA, P. S.; UNGVICHIAN, V. Electromagnetic Fields Due to Overhead and Burried High-Voltage Power Lines: A Quantative Comparison. **Southeastcon '89. Proceedings. Energy and Information Technologies in the Southeast., IEEE**, Columbia, 9-12 Abril 1989. 682 - 685.

NOURIRAD, G.; GOMES, C.; KADIR, M. Z. A. A. Corona losses: Issues and solutions. **Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), IEEE 7th International**, Langkawi, 3-4 Junho 2013. 405 - 410.

OLSEN, R. G. Electromagnetic Fields From Power Lines. **Electromagnetic Compatibility. Symposium Record. IEEE International Symposium on**, Dallas, 9-13 Agosto 1993. 138 - 143.

ONS. **Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão**. Procedimentos de Rede Submódulo 2.4. [S.l.]. 2000.

PHAIBOON, S.; VIVEK, V.; SOMKUARNPANIT, S. Analysis and Measurement of Radio-Frequency Interference due to the Corona from 500 kV Transmission Lines. **TENCON 2000. Proceedings,1**, Kuala Lumpur, 24-27 Setembro 2000. 88 - 91.

SANTOS, J. S. et al. A MatLab based software for measument of transmission line fields. **Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). IEEE PES**, Hilton Anaheim, 17-19 Janeiro 2011. 1 - 6.

SARMENTO, R. M. Electric and Magnetic Fields in Overhead Power Transmission Lines. **Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina), 10, 4**, Junho 2012. 1909 - 1915.

SFORZINI, M. et al. Acoustic noise caused by a.c. corona on conductors: Results of an experimental investigation in the anechoic chamber. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on,94 ,2**, Março 1975. 591 - 601.

SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-93, 5**, Setembro 1974. 1660 - 1668.

TANABE, K.; TAKEBE, T.; ISOZAKI, M. Reduction of Audible Noise Using Asymmetrical Bundles for 1000 kV Transmission Lines: Full-Scale Test Results of Akagi Test Line. **Power Delivery, IEEE Transactions on,11 ,3**, Julho 1996. 1482 - 1491.

TAYLOR, E. R.; CHARTIER, V. L.; RICE, D. N. Audible Noise and Visual Corona from HV and EHV Transmission Lines and Substation Conductors - Laboratory Tests. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-88, 5**, Maio 1969. 666 - 679.

TOWNSEND, J. S. **Electricity in Gases**. London: [s.n.], 1914.

UNDE, M. G.; KUSHARE, B. E. Analysis of Electromagnetic Fields of 1200kV UHV-AC Transmission Lines. **Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 5th International Conference on**, Mathura, 27-29 Setembro 2013. 580 - 584.

WAGNER, C. F.; GROSS, I. W.; LLOYD, B. L. High-Voltage Impulse Tests on Transmission Lines. **Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 73, 1**, Janeiro 1954.

WERTHEIMER, N.; LEEPER, E. Electrical Wiring Configurations and Childhood Cancer. **American Journal of Epidemiology**, 1979. 273-283.

YANG, K.-H. et al. New Formulas for predicting Audible Noise from Overhead HVAC Lines Using Evolutionary Computations. **Power Delivery, IEEE Transactions on, 15, 4**, Outubro 2000. 1243 - 1251.

YOUSSEF, M. The Use of Corona Phenomena to Measure the Voltage of Transmission Lines. **Instrumentation and Measurement Technology Conference. Proceedings of the 18th IEEE, 2**, Budapest, 21-23 Maio 2001. 1051-1054.

YUNPENG, L. et al. UHV AC corona loss measurement and analysis under rain. **Properties and Applications of Dielectric Materials. ICPADM. IEEE 9th International Conference on the**, Harbin, 19-23 Julho 2009. 130 - 133.

ZHAO, L.; LU, J.; WU, G. Measurement and Analysis on Electromagnetic Environment of 1000kV UHV AC Transmission Line. **Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Asia Pacific**, Shangai, 27-29 Março 2012. 1 - 4.