

UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Rearranjo Otimizado dos Feixes de Condutores de Linhas  
de Transmissão com o Foco Centrado na Minimização de  
Impactos Eletromagnéticos.**

Milton Tavares de Melo Neto

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**Rearranjo Otimizado dos Feixes de Condutores de  
Linhas de Transmissão com o Foco Centrado na  
Minimização de Impactos Eletromagnéticos.**

por

**MILTON TAVARES DE MELO NETO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do  
grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**ORIENTADOR: Prof. Luiz Henrique Alves de Medeiros,  
Docteur**

Recife, Dezembro de 2007.

**M528r      Melo Neto, Milton Tavares de.**

Rearranjo otimizado dos feixes de condutores de linhas de transmissão com o foco centrado na minimização de impactos eletromagnéticos / Milton Tavares de Melo Neto. – Recife: O Autor, 2007.

xv, 98 f.; il., tabs.

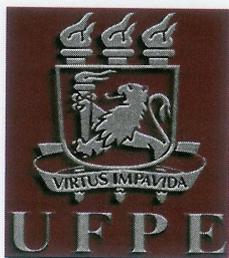
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2007.

Inclui Referências Bibliográficas e Apêndices.

**1. Engenharia Elétrica. 2. Otimização de Campos. 3. Linhas de Transmissão. 4. Interferência Eletromagnética em Linhas de Transmissão. 5. Campos Elétricos. 6. Campos Magnéticos. I. Título.**

**621.3 CDD (22.ed.)**

**UFPE/BCTG/2008-166**



**Universidade Federal de Pernambuco**

**Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DE

**MILTON TAVARES DE MELO NETO**

TÍTULO

**“REARRANJO OTIMIZADO DOS FEIXES DE CONDUTORES DE  
LINHAS DE TRANSMISSÃO COM O FOCO CENTRADO NA  
MINIMIZAÇÃO DE IMPACTOS ELETROMAGNÉTICOS”**

A comissão examinadora composta pelos professores: LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS, DEESP/UFPE, RENATO EVANGELISTA DE ARAÚJO, DES/UFPE e JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, DEESP/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **MILTON TAVARES DE MELO NETO** **APROVADO**.

Recife, 20 de dezembro de 2007

**EDUARDO FONTANA**  
Coordenador do PPGE

**LUIZ HENRIQUE ALVES  
DE MEDEIROS**  
Orientador e Membro Titular Interno

**JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS  
BEZERRA**  
Membro Titular Externo

**RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO**  
Membro Titular Interno

Dedico este trabalho, primeiramente, aos meu avós: Enilza Soares e Pedro Pereira que a muito partiram, mas nunca deixaram de olhar por mim, a minha família e aos meus amigos.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre me fez superar as dificuldades que surgiram. Agradeço aos meus pais Gildete e Milton que sempre estiveram do meu lado em todos os momentos. Agradeço a minha segunda mãe Marlene, as minhas irmãs Rhaissa e Leônia e a minha namorada Cláudia pelo apoio e paciência que tiveram para comigo nos momentos que mais precisei dedicar-me a esse trabalho. Agradeço ao meus tios Marcos, Mauro e Marcelo, pois foram minhas fontes de inspiração e de incentivo para o ingresso e conclusão do mestrado. Agradeço ao professor José Maurício por todo apoio que me foi dado desde o momento em que decidi ingressar no mestrado até momento da defesa da dissertação e ao professor Luiz Henrique por toda atenção, disposição e orientação dada para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ao professor Francisco Neves, de quem fui monitor, pois foi durante o período de monitoria que decidi ingressar no mestrado. Tenho que agradecer ao meu orientador de estágio Eduardo Varela, pois foram suas explicações que me fizeram interessar sobre o tema dessa dissertação. Por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos Gustavo, Gabriela, Josinaldo e Alessandro por todo apoio e pelo privilégio que tive em conhecer e conviver com os mesmos durante minha vida acadêmica.

MILTON TAVARES DE MELO NETO

*Universidade Federal de Pernambuco*

*20 de Dezembro de 2007*

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**REARRANJO OTIMIZADO DOS FEIXES DE CONDUTORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COM O FOCO CENTRADO NA MINIMIZAÇÃO DE IMPACTOS ELETROMAGNÉTICOS.**

**Milton Tavares de Melo Neto**

Dezembro/2007

**Orientador:** Prof. Luiz Henrique Alves de Medeiros, Docteur

**Área de Concentração:** Processamento de Energia

**Palavras-chaves:** Otimização de Campos, Linhas de Transmissão, Interferência Eletromagnética em Linhas de Transmissão, Campos Elétricos, Campos Magnéticos

**Número de páginas:** 98

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de novas disposições dos condutores de linhas transmissão visando a minimização dos campos elétricos e magnéticos produzidos pelas mesmas. Para isso, foram utilizadas as equações de campo elétrico e magnético formuladas a partir da Lei de Coulomb e Ampere, respectivamente. Os cálculos desses campos tiveram os resultados validados através de comparação com outros encontrados em literatura. A minimização dos campos foi conseguida utilizando-se técnicas de otimização matemática diante das equações de campos encontradas. As restrições adotadas para a minimização, foram definidas de forma que as novas disposições dos condutores encontradas, pudessem ser aplicadas nas estruturas existentes da linha. O trabalho trás como exemplo, a minimização de campos em uma linha de  $500kV$ , possuidora de padrão estrutural tipicamente utilizado pela Chesf na Região Nordeste do Brasil. Foram obtidas várias disposições dos condutores para esta linha, sendo conseguido uma diminuição de até 31% e 10% nos valores de campo elétrico e magnético, respectivamente, máximos da linha.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

**OPTIMIZATION OF CONDUCTOR BUNCHES OF TRANSMISSION  
LINE WITH EMPHASIS IN THE DECREASE OF  
ELECTROMAGNETIC IMPACTS.**

**Milton Tavares de Melo Neto**

December/2007

**Supervisor:** Prof. Luiz Henrique Alves de Medeiros, Docteur

**Area of Concentration:** Energy Processing

**Keywords:** Fields Optimization, Transmission lines, Power transmission electromagnetic interference, Electric fields, Magnetic fields

**Number of pages:** 98

This dissertation is about new transmission line conductors disposition, to minimization of the electric and magnetic fields produced for her. For this, electric and magnetic fields equations, from Coulomb and Ampère Law, has been used. The results were validated through comparison with others results in the literature. The fields minimization has been performed using mathematics optimization technics. The restrictions adopted for the minimizations were defined in a way that for the new dispositions of the conductors could be applied in the existing structures of the line. The dissertation show as exemple the minimization of the fields in a  $500kV$  transmission line, that uses a standard structure typically used for Chesf (Companhia Hidroelétrica do São Francisco). Several dispositions of the conductors for this line were proposed, it has been found a decrease up to 31% e 10% in the maximum electric and magnetic fields of the line.

# CONTEÚDO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução . . . . .	5
2.2	Campos Endógenos . . . . .	6
2.3	Correntes Induzidas por Campos Elétricos de Baixa Frequência	7
2.4	Efeitos Biológicos dos Campos Elétricos e Magnéticos de ELF .	9
2.5	Efeitos Indiretos e Estudos com Voluntários . . . . .	12
2.6	Conclusão . . . . .	14
<b>3</b>	<b>LIMITES DE EXPOSIÇÃO - NORMAS</b>	<b>15</b>
3.1	Introdução . . . . .	15
3.2	Restrições básicas e Níveis de referência . . . . .	16
3.3	Limites para Exposição Ocupacional e Público em Geral . . . . .	16
3.4	IEC . . . . .	17
3.5	CENELEC . . . . .	17
3.6	IEEE . . . . .	18
3.7	ICNIRP . . . . .	19
3.8	Normas Brasileiras . . . . .	22
3.9	Princípio da Precaução . . . . .	23
3.10	Conclusão . . . . .	24

<b>4</b>	<b>CÁLCULO E OTIMIZAÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS ORIUN-</b>	
	<b>DOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO</b>	<b>26</b>
4.1	Introdução . . . . .	26
4.2	Cálculo de Campos abaixo de Linhas de Transmissão . . . . .	26
4.3	Cálculo de campo magnético pela Lei de Ampere . . . . .	29
4.3.1	Intensidade de Campo Magnético em um ponto $p(x, y)$ devido à corrente $I_i$ de um condutor no ponto $(x_i, y_i)$ . . .	31
4.3.2	Presença do Solo e Condutores Imagem . . . . .	32
4.3.3	Presença de N condutores . . . . .	36
4.3.4	Resultados . . . . .	37
4.4	Cálculo de campo elétrico pela Lei de Coulomb . . . . .	39
4.4.1	Campo Elétrico em um ponto $p(x, y)$ devido às carga $q_i$ de um condutor com tensão $V_i$ no ponto $(x_i, y_i)$ . . . . .	40
4.4.2	Presença do Solo . . . . .	42
4.4.3	Presença de N fases distintas . . . . .	45
4.4.4	Cálculo da carga . . . . .	46
4.4.5	Resultados . . . . .	47
4.5	Otimização de Campos . . . . .	48
4.5.1	Funções Objetivo . . . . .	49
4.5.2	Restrições . . . . .	50
4.6	Conclusão . . . . .	52
<b>5</b>	<b>MINIMIZAÇÃO DE CAMPOS EM LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500kV</b>	<b>53</b>
5.1	Introdução . . . . .	53
5.2	Minimização de Campos . . . . .	53
5.2.1	Definição dos pontos de minimização . . . . .	57
5.2.2	Cabos-guarda . . . . .	59

5.3	Restrições . . . . .	62
5.4	Minimização de Campos - $d_{min}$ igual para todas as fases . . . . .	66
5.5	Minimização de Campos - $d_{min}$ diferente para cada fase . . . . .	71
5.5.1	Restrição por $d_{min}$ pré-definidas, diferentes para cada fase	71
5.5.2	Restrição pela soma da $d_{min}^a$ , $d_{min}^b$ e $d_{min}^c$ . . . . .	73
5.6	Conclusão . . . . .	75
6	CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
Apêndice A PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA - LOQO E AMPL		83
A.1	Introdução . . . . .	83
A.2	LOQO . . . . .	83
A.3	AMPL . . . . .	84
A.3.1	Funções e operadores . . . . .	85
A.4	Exemplo de aplicação . . . . .	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		94

# LISTA DE FIGURAS

2.1 Prisma retangular equivalente de objetos retangulares para o cálculo da $I_{sc}$ . . . . .	8
4.1 Representação da simplificação de um vão de linha considerando o condutor como sendo paralelo ao solo. . . . .	28
4.2 Representação da vista lateral e seção transversal de um condutor suspenso. . . . .	29
4.3 Representação dos condutores e suas respectivas imagens no cálculo de campo magnético . . . . .	30
4.4 Representação do campo magnético no ponto $p$ distante de $d_1$ de um condutor pelo qual está passando uma corrente $I_1$ . . . . .	31
4.5 Representação do vetor intensidade de campo $\vec{H}_1$ e suas componentes horizontal ( $\vec{H}_{1h}$ ) e vertical ( $\vec{H}_{1v}$ ). . . . .	31
4.6 Representação do vetor intensidade de campo $\vec{H}_1$ e suas componentes considerando a presença do solo . . . . .	34
4.7 LT 69kV tipo C carregada com uma corrente de 300A . . . . .	38
4.8 LT 69kV tipo H carregada com uma corrente de 300A . . . . .	38
4.9 LT 500kV com espaçamento entre condutores de uma mesma fase de 0.47cm, carregada com uma corrente de 2000A . . . . .	38
4.10 LT 500kV que utiliza técnica de LPNE, carregada com uma corrente de 2000A . . . . .	39
4.11 Representação dos condutores e suas respectivas imagens no cálculo de campo magnético. . . . .	40

4.12	Representação do campo elétrico no ponto $p$ distante $d_1$ de um condutor sob tensão $V_1$ . . . . .	41
4.13	Representação do vetor campo elétrico $\vec{E}_1$ e suas componentes horizontal e vertical, $\vec{E}_{1h}$ e $\vec{E}_{1v}$ . . . . .	41
4.14	Representação do vetor campo elétrico $\vec{E}_1$ e suas componentes considerando a presença do solo . . . . .	43
4.15	LT 69kV tipo C. . . . .	47
4.16	LT 69kV tipo H. . . . .	48
4.17	LT 500kV com espaçamento entre condutores de uma mesma fase de 0.47cm. . . . .	48
4.18	LT 500kV que utiliza técnica de LPNE. . . . .	48
4.19	Representação das fronteiras limites dentro das quais os condutores podem estar na nova configuração. Linha de 500kV com 47cm de espaçamento entre condutores de uma mesma fase. . . . .	51
4.20	Representação das fronteiras limites dentro das quais os condutores podem estar na nova configuração juntamente com a distância mínima entre fases adotada para este exemplo. Linha de 500kV com 47cm de espaçamento entre condutores de uma mesma fase. . . . .	51
5.1	Disposição dos condutores de uma LT 69kV tipo H. . . . .	54
5.2	LT 69kV tipo H carregada com uma corrente de 300A. . . . .	54
5.3	Disposição dos condutores de uma LT 230kV circuito duplo. . . . .	55
5.4	LT 230kV circuito duplo faseamento abcabc carregada com uma corrente de 800A. . . . .	55
5.5	Disposição dos condutores de uma LT 500kV padrão Chesf. . . . .	57
5.6	Campos elétrico (a) e magnético (b) para disposição dos condutores mostrada na Figura 5.5. Linha carregada com uma corrente de 2000A. . . . .	58
5.7	Resultado de minimização de campo elétrico na LT 500kV, utilizando ponto 24m e 0.30 entre condutores de uma mesma fase. . . . .	59

5.8	Representação da area de proteção dos cabos-guarda (abaixo da linha verde pontilhada), junto com área que pode ser ocupada pelos condutores (em vermelho). . . . .	60
5.9	Disposição dos condutores de uma LT 230kV circuito duplo. . . . .	61
5.10	LT 230kV circuito duplo faseamento abcabc carregada com uma corrente de 800A sem cabo-guarda. . . . .	61
5.11	Disposição dos condutores de uma LT 500kV padrão Chesf. . . . .	61
5.12	LT 500kV carregada com uma corrente de 2000A. . . . .	62
5.13	Representação da area que pode ser ocupada pelos condutores, em vermelho. . . . .	64
5.14	Disposição dos condutores após minimização de campo magnético para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas. . .	68
5.15	Perfil de campo magnético após minimização para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas. . . . .	68
5.16	Disposição dos condutores após minimização de campo elétrico para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas. . . . .	69
5.17	Perfil de campo elétrico após minimização para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas. . . . .	70
5.18	Disposição dos condutores após minimização de campo elétrico para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas- $d_{min}^a, d_{min}^b$ e $d_{min}^c$ respectivamente. . . . .	72
5.19	Perfil de campo elétrico após minimização para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas- $d_{min}^a, d_{min}^b$ e $d_{min}^c$ respectivamente. . . . .	72
5.20	Representação das áreas que podem ser ocupadas pelos condutores de cada fase. . . . .	73
5.21	Resultado da restrição $Soma_d \geq 3,3m$ . . . . .	74
5.22	Resultado da restrição $Soma_d \geq 3,3m$ e $K_2 = 1,4$ . . . . .	75
5.23	Disposição dos condutores para minimização de campo elétrico da LT de 500kV com a presença dos CG. . . . .	76

5.24	LT 500kV apresentada na Figura 5.23 com minimização de campo elétrico e presença dos <i>CG</i> . . . . .	76
5.25	Disposição dos condutores para minimização de campo elétrico da LT de 500kV com a presença dos <i>CG</i> . . . . .	77
5.26	LT 500kV apresentada na Figura 5.25 com minimização de campo elétrico e presença dos <i>CG</i> . . . . .	77
5.27	Disposição dos condutores para minimização de campo elétrico da LT de 500kV com a presença dos <i>CG</i> . . . . .	78
5.28	LT 500kV apresentada na Figura 5.27 com minimização de campo elétrico e presença dos <i>CG</i> . . . . .	78
A.1	Função de Rosenbrock. . . . .	87
A.2	Tela de execução do AMPL, junto com os resultados. . . . .	91
A.3	Telas dos arquivos .mod e .dat. . . . .	92
A.4	Tela de execução do AMPL, junto com os resultados. . . . .	92

# LISTA DE TABELAS

3.1	Limites CENELEC ( $60Hz$ )- Norma ENV 50166-1. . . . .	18
3.2	Limites IEEE ( $60Hz$ )- Norma C95.6 . . . . .	18
3.3	Restrições básicas para campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo. . . . .	20
3.4	Níveis de referência para exposição ocupacional a campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo.[7] . . . . .	21
3.5	Níveis de referência para exposição do público em geral a campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo.[7] . . . . .	22
3.6	Limites propostos pela NBR 15145 ( $60Hz$ ) . . . . .	23
3.7	Limites de campos adotados neste trabalho. . . . .	25
4.1	Comparação dos valores máximos de campo magnético para uma linha de $69kV$ tipo H carregada com uma corrente de $300A$ para valores diferentes de resistividade do solo. . . . .	33
5.1	Pontos e pesos utilizados para minimização dos campos elétrico e magnético da linha de $500kV$ , padrão Chesf. . . . .	58
5.2	Comparação entre estruturas com e sem cabos-guarda dos valores máximos de campos elétrico e magnético . . . . .	62
5.3	Restrições utilizadas, em metros, para linha de $500kV$ , padrão Chesf. Eixo da linha em $x = 13m$ . . . . .	63
5.4	Distância entre condutores de uma mesma fase, em metros, para linha de $500kV$ . . . . .	64

5.5	Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.11. . . . .	64
5.6	Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.14. . . . .	69
5.7	Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.16. . . . .	70
5.8	Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.18 . . . . .	73
5.9	Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.21. . . . .	74
5.10	Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.22 . . . . .	75
5.11	Campos máximos, potência natural e percentual de variação dos campos e da potência natural para as disposições da Figura ?? . . . . .	76
5.12	Campos máximos, potência natural e percentual de variação dos campos e da potência natural para as disposições da Figura 5.25. . . . .	77
5.13	Campos máximos, potência natural e percentual de variação dos campos e da potência natural para as disposições da Figura 5.27 . . . . .	78
A.1	Operadores lógicos, aritméticos e conjuntos.[46] . . . . .	86
A.2	Funções aritméticas e vetoriais.[46] . . . . .	86
A.3	Tabela de Parâmetros. . . . .	88
A.4	Arquivo Rosenbrock.dat. . . . .	89
A.5	Arquivo Rosenbrock.mod. . . . .	89
A.6	Arquivo Rosenbrock.mod. . . . .	89
A.7	Arquivo Rosenbrock.mod. . . . .	90
A.8	Ordem dos comandos para utilização do AMPL . . . . .	90
A.9	Acréscimo de comandos nos arquivos .mod e .dat . . . . .	91

# 1

## INTRODUÇÃO

Na fase de planejamento de uma Linha de Transmissão (LT) uma das etapas consiste na análise das intensidades de campos magnéticos e elétricos produzidos pela mesma a fim de evitar problemas de compatibilidade eletromagnética em áreas limítrofes à linha. Nos últimos anos o aumento gradativo da população mundial além de acarretar uma maior demanda de energia, faz com que áreas livres tão desejadas, para passagem de linhas de transmissão, sejam cada vez mais raras. É comum observar, principalmente nos arredores dos grandes centros urbanos, a passagem de linhas de alta e extra-alta tensão, muito próximas a áreas densamente povoadas. Essa proximidade traz consequências sérias como o aumento no número de invasões das faixas das linhas e, também, das queixas da população quanto aos efeitos causados pelos campos eletromagnéticos emitidos pelas LT.

As linhas de transmissão não são as únicas fontes artificiais de campos eletromagnéticos nos dias de hoje. Outros equipamentos como: televisão, computadores e celulares também produzem esses campos. Porém, as LT tendem atrair mais atenção que os outros equipamentos, sejam pelo seu porte - existem linhas com mais de  $1000\text{km}$  de extensão e que utilizam estruturas com mais de  $30\text{m}$  de altura, algumas cruzando grandes centros urbanos [1] - ou pelo fato de não trazerem benefícios diretos a população por onde passam se comparados a outros equipamentos que produzem campos, como os eletrodomésticos. Os estudos mostram que alguns eletrodomésticos podem produzir picos de campo maiores que os campos emitidos pelas linhas de transmissão.

Desde a década de sessenta os efeitos biológicos da exposição a campos eletromag-

néticos vêm sendo estudados, tanto em eletricitários - trabalhadores expostos a campos elétricos - quanto em pessoas que moram próximas às linhas de transmissão. Muitos estudos vêm relatando efeitos à saúde humana como: aumento no risco de câncer; com destaque para leucemia em crianças, efeitos na gravidez, fosfenos visuais, redução do batimento cardíaco, entre outros. Porém não existe um consenso sobre esses efeitos biológicos, havendo algumas vezes, a contraposição entre estudos. O que se pode afirmar sobre a exposição a campos eletromagnéticos são seus efeitos indiretos que surgem imediatamente quando o corpo é exposto a campos. Esses efeitos são relatados por voluntários expostos a campos, onde destacam-se: formigamento, pelos eriçados, estímulos de músculos periféricos e outros mais. Como os efeitos indiretos são respaldados por estudos em laboratório, as normas do setor tendem a considerar apenas estes e desprezar os efeitos biológicos, que teoricamente surgiram da exposição prolongada a campos.

Sabe-se que o campo elétrico e magnético em um determinado ponto do espaço depende da interação dos campos das diversas fontes que o produzem. De forma simplificada, os campos oriundos de uma LT podem ser pensados como sendo produzidos devido a diversas fontes. Tendo em vista que um condutor submetido a uma tensão e pelo qual passe uma corrente elétrica é uma fonte de campo elétrico e magnético, pode-se pensar cada condutor da linha como uma fonte desses campos. Sendo assim, modificando a interação entre os campos produzidos por cada condutor modificam-se os valores de campo produzidos por esses condutores. Dessa forma este trabalho vem propor a minimização dos campos elétricos e magnéticos produzidos pelas LT através do rearranjo das disposições dos condutores dessa linha.

Apresenta-se a seguir a estrutura deste trabalho:

No Capítulo 2 é apresentada a definição e os aspectos fundamentais dos Campos Eletromagnéticos de Baixa Freqüência, bem como um apanhado geral, baseada no histórico literário, a respeito de seus efeitos à saúde.

No Capítulo 3 são apresentados os conceitos básicos para o entendimento das Normas referentes à exposição a campos, juntamente com um breve resumo das principais normas, nacionais e internacionais, que tratam do assunto.

São apresentados no Capítulo 4 os métodos de cálculo dos campos elétricos e magnéticos, provenientes das linhas de transmissão, adotados neste trabalho, bem como

sua utilização para otimização desses campos.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados alcançados com a minimização dos campos através do rearranjo dos condutores da linha, juntamente com as restrições e critérios adotados nestes.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais a respeito dos resultados alcançados neste trabalho.

# 2 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA

## 2.1 Introdução

Campos de Baixa Frequência -*Extremely Low Frequency(ELF) Fields*, se refere aos campos que possuem uma dinâmica *quase estática* devido ao seu grande comprimento de onda ( $\lambda$ ), na ordem de  $1000km$ . Na escala de frequência ( $f$ ) de 30 a  $300Hz$  os campos são tratados de forma separada, independentes, como se fossem gerados por fontes ortogonais, quase estáticas, de campo elétrico e magnético[3][2].

Na interação com os seres vivos os campos elétrico e magnético se comportam, também, de forma independente. Em materiais que possuem as propriedades eletromagnéticas dos tecidos vivos, esses campos caracterizam-se por manter o grande comprimento de onda e possuem alta capacidade de penetração, *skin depth* - distância na qual o campo magnético decai a 37% do seu valor inicial na superfície. Por exemplo, campos magnéticos com frequência de  $60Hz$  possuem profundidade de penetração na pele de aproximadamente  $150m$ .

Como todo equipamento elétrico é uma fonte de campo eletromagnético e considerando a variedade de equipamentos existentes hoje em dia; de eletrodomésticos a geradores de energia, tem-se fontes de campo de tipos e intensidades variadas. Em média estes equipamentos geram uma densidade de fluxo magnético ( $B$ ) em torno de  $10\mu T$ . Em uma linha de transmissão, por exemplo, tem-se como valor típico de amplitude de campo elétrico ( $E$ ) de  $10kV/m$  abaixo dos condutores e de 1 a  $2kV/m$  no limite da faixa de passagem. Em uma residência típica, a densidade de fluxo é de

$0,1\mu T$ . Estudos mostram ainda, que os campos produzidos pela terra na faixa da frequência industrial (50 e  $60Hz$ ) estão em torno de  $10^{-4}V/m$  para campo elétrico e de  $50\mu T$  para densidade de fluxo magnético [40]. Essa gama de valores mostra que os valores típicos de campos são tão variados quanto suas fontes produtoras.

Focalizando nos campos de ELF, que tem como uma das fontes produtoras a linhas de transmissão, este capítulo apresenta a definição e os aspectos fundamentais dos campos eletromagnéticos de baixa frequência, bem como um apanhado geral, baseada no histórico literário, a respeito de seus efeitos à saúde.

## 2.2 Campos Endógenos

O conceito de campos endógenos - campos criados pelos movimentos das cargas que compõem as células - se mostra importante para o entendimento de algumas pesquisas realizadas nos últimos anos. Muitos cientistas acreditam que os campos de ELF, criados pelas fontes citadas anteriormente, são tão pequenos que não afetam os sistemas biológicos. Esse pensamento se deve ao fato de que esses campos, geralmente, têm intensidades menores que os campos endógenos. Isto se deve a redução brusca que um campo na superfície do corpo sofre quando penetra no mesmo. Estudos mostram que o campo elétrico no interior do corpo chega a ser reduzido a oitava parte do campo original que se encontra na superfície do corpo [40]. Ou seja, dado um campo elétrico  $E_0$  na superfície do corpo, em seu interior esse campo terá um valor dado, aproximadamente, pela relação:

$$E_I = 10^{-8}E_0 \quad (2.1)$$

sendo

$E_I$  o campo elétrico interno.

$10^{-8}$  a profundidade de penetração típica do corpo.

Muitos laboratórios vêm fazendo pesquisas para descobrir quais intensidades de campo poderiam afetar organismos vivos. Até agora, infelizmente, os resultados não são conclusivos. Weaver e Astumian (1990) calcularam que; os campos endógenos de baixa frequência, no pior dos casos, deveriam estar na ordem de  $130V/m$  para que

pudessem afetar, de algum modo, os tecidos vivos. Segundo os mesmos, um campo externo ao corpo deveria ter amplitude na ordem de  $3900kV/m$  para que o campo interno induzido por ele pudesse ser distinguido dos campos endógenos. Para se ter uma idéia dessa ordem de grandeza, esse valor de campo elétrico externo é tão alto que o ar não suportaria e perderia sua característica dielétrica.

Porém, na mesma pesquisa os autores afirmam que se pode fazer com que as células respondam à presença de campos de baixa intensidade. Por exemplo, uma célula que produz um campo na ordem de  $130V/m$ , exposta a um campo de  $1kV/m$ , necessitaria de três dias para ser estimulada e reagir de alguma forma, mostrando que percebeu a presença do campo externo. Ou seja, as células teriam que estar expostas durante um longo período a esses campos para que apresentassem alguma reação [40].

### 2.3 Correntes Induzidas por Campos Elétricos de Baixa Frequência

A interação entre campos elétricos de baixa frequência e objetos induz campos e, por sua vez, correntes nesses objetos. Geralmente essas correntes apresentam valores muito baixos e na maioria das vezes não causam lesões, apenas, sensações dolorosas. Porém, dependendo da intensidade do campo elétrico e do tamanho do objeto, essas correntes podem alcançar valores significativos.

De forma simplificada, podemos dizer que a densidade de corrente  $J$  induzida por um campo elétrico  $\vec{E}_0$ , no qual o objeto está envolto, é dada pela Lei de Ohm [40].

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}_0 \quad (2.2)$$

onde,

$\sigma$  é a condutividade, por metro, do objeto.

Partindo desta equação, a corrente de curto-circuito induzida -  $I_{sc}$  - em um objeto exposto a um campo elétrico  $\vec{E}_0$  em sua superfície, pode ser dada multiplicando-se a densidade de corrente induzida pela área superficial total do objeto [42].

$$I_{sc} = j2\pi f \epsilon_0 E_0 S \quad (2.3)$$

onde

$f$  é a frequência em  $[Hz]$ .

$\varepsilon_0$  a permissividade do meio.

$S$  é a área superficial total do objeto  $[m^2]$ .

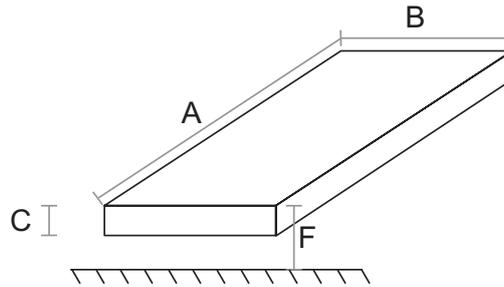


Figura 2.1: Prisma retangular equivalente de objetos retangulares para o cálculo da  $I_{sc}$ .

Um objeto como, por exemplo, um carro a baixo de uma linha, pode ser representado por um prisma retangular equivalente como na figura 2.1. Onde as dimensões  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $F$  são dadas pela média das do objeto real. Fato importante de ser observado é que a dimensão  $C$ , que é a distância média das menores distâncias do objeto ao solo, pode ser desconsiderada, pois geralmente  $F \gg C$ . Já objetos que possuam formatos cilíndricos como cabos, cercas ou calhas, a  $I_{sc}$  induzida pode ser obtida através da equação abaixo [42].

$$I_{sc} = j2\pi f E_0 h \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{2h}{GMR'}} \quad (2.4)$$

sendo

$h$  a altura do objeto ao solo em  $m$ .

$GMR'$  o raio médio geométrico eletrostático do objeto.

Partindo da Equação 2.3 pode-se chegar, também, a uma expressão aproximada da corrente de curto-circuito induzida em uma pessoa, envolta por um campo elétrico. Estando a pessoa aterrada, e considerando um valor aproximado da condutividade do tecido humano, a  $I_{sc}$  em  $\mu A$  será dada por [40]:

$$I_{sc} = 15 \cdot 10^{-8} f W_T^{\frac{2}{3}} E_0 \quad (2.5)$$

sendo

$W_T$  o peso da pessoa [ $g$ ].

Sendo assim, um homem pesando  $70kg$  submetido a um campo de  $10kV/m$  terá uma corrente de aproximadamente  $152\mu A$  passando pelo seu corpo [40]. Essa grandeza de corrente é muito pequena para causar algum dano ao tecido humano. Com isso, podemos afirmar que correntes induzidas por campos elétricos dificilmente causariam danos aos seres humanos. Porém veremos que algumas sensações provocadas pelo campo elétrico não estão diretamente ligadas ao valor da corrente induzida no corpo.

## 2.4 Efeitos Biológicos dos Campos Elétricos e Magnéticos de ELF

Os primeiros estudos tratando da exposição aos campos de baixa frequência e seus efeitos na saúde, se deram na antiga União Soviética em meados da década de 1960. Trabalhadores de campo haviam relatado o surgimento de vários problemas de saúde. Das enfermidades relatadas destacavam-se problemas no sistema cardiovascular, digestivo e sistema nervoso central. Desde então vários estudos foram realizados a fim de determinar a relação entre campos de ELF e efeitos biológicos.

No início da década de 1980, foi feito um estudo englobando várias classes de trabalhadores expostos aos campos gerados por equipamentos elétricos, os chamados eletricitários. Neste grupo, foram incluídas quase todas as categorias que trabalhavam com equipamentos elétricos na época como: engenheiros eletricitistas, engenheiros eletrônicos, técnicos em televisão e rádio, eletricitistas, operador de projetores e técnicos telefônicos. As análises mostraram um aumento no risco da ocorrência, principalmente, de leucemia nestes trabalhadores. Contudo, no trabalho não foi possível caracterizar bem as classes de exposição a campos, o que seria essencial para este tipo de estudo. Um trabalhador normalmente estava exposto a mais de uma classe de campo ao mesmo tempo. Mesmo assim, o estudo gerou dados importantes como a determinação dos valores de exposição em que estão baseados as medições atuais [40][18]. Vários estudos similares a este foram realizados até então. Contudo, muitos apresentaram os mesmos resultados contraditórios [11][25][19]. Boa parte dos estudos mostra um aumento no risco de câncer entre os eletricitários, porém se contradizem quanto aos tipos de câncer. Por fim, o que se pode concluir é que trabalhadores expostos a grandes intensidades de campo elétrico e ou magnético, têm uma maior probabilidade de desenvolver al-

guns tipos de câncer. Porém, ainda não está fundamentado como os campos elétrico e magnético induzem o desenvolvimento desses cânceres.

Uma das principais preocupações quanto aos efeitos dos campos é sua ação sobre mulheres grávidas. Estudos realizados com gestantes que trabalhavam com equipamentos emissores de campo de ELF, como monitores de vídeo, não encontraram nenhuma pré-disposição das mulheres expostas a sofrerem abortos não espontâneos [28]. Já outro estudo, sugeriu alguma associação deste tipo, mas, foi logo questionado na mesma época, por outro que não verificou tal associação [16][26]. Várias pesquisas sucederam-se a essas, e em sua maioria não encontraram qualquer associação entre campos de baixa frequência e efeitos nocivos na reprodução humana [31].

Um outro ponto controverso e que vem sendo discutido ao longo das últimas décadas, é a possibilidade da ligação entre campos de ELF e o aparecimento de câncer em moradores de áreas vizinhas à LT, principalmente crianças. Suspeitava-se que os campos magnéticos, na frequência industrial, de fontes externas às residências estivessem, de alguma forma, relacionados à ocorrência de alguns tipos de câncer infantil, com destaque para a leucemia. Essa preocupação aumentou no final da década de 70 quando um estudo associou a mortalidade infantil por câncer com a proximidade de LT às casas [39]. Até o final da década de noventa, dezenas de trabalhos haviam sido publicados sobre o assunto [13][33][21][17]. Esses trabalhos tomaram como base, principalmente, as distâncias das linhas às residências, carregamento e configuração da linha entre outros. Analisando alguns desses estudos, vê-se que os resultados relacionados à leucemia infantil são os mais consistentes. Embora, algumas pesquisas, sugiram que os campos magnéticos de baixa frequência produzidos por LT, aumentem o risco de crianças que morem próximas às linhas, desenvolverem leucemia, há incertezas quanto à generalização dos resultados obtidos por essas [12]. Seja pelo número de casos analisados, pelos métodos de medição de campos, ou ainda, pelas ferramentas estatísticas adotadas, quase todos os trabalhos possuem "lacunas" que permitem o questionamento de seus resultados. De fato, parece uma tarefa impossível determinar com precisão o tempo de exposição, as intensidades e os tipos de campos a que uma pessoa está exposta durante o dia. Mesmo morando próximas à LT, as pessoas não costumam passar o dia em suas residências. É plausível pensar que, em média, uma pessoa passe pelo menos um terço de sua vida em casa, porém surgem outros problemas. No estágio de desenvolvimento do mundo de hoje em qualquer lugar que uma pessoa esteja difícil-

mente estará exposta a uma única fonte de campo eletromagnético. Apesar de estudos mostrarem que aparelhos eletrodomésticos não causam mal a saúde, é difícil precisar se a interação das diversas fontes de campo não o cause [34][35].

Em meio às incertezas geradas pelos estudos ocupacionais, estudos com células e animais se mostram mais concisos. Talvez por lidarem com estruturas menos complexas, estudos ligados diretamente às células, ao em vez de sistemas multicelulares, os resultados parecem convergir na maior parte das vezes. Esses estudos mostram que certos valores de grandezas elétricas, aparentemente desprezíveis, podem afetar o funcionamento das células. Por exemplo, intensidades de correntes incapazes de estimular diretamente tecidos excitáveis podem, no entanto, influenciar na excitabilidade de neurônios [31][37]. Mostram, também, que o sistema nervoso central é sensível aos campos elétricos endógenos, produzidos por células vizinhas, em níveis abaixo dos necessários para estimulação direta. Outras pesquisas sugerem que sinais elétricos de ELF são transferidos através da membrana da célula ao seu interior. Esses sinais podem provocar respostas bioquímicas que causam mudanças no estado da célula, como aumento de sua proliferação, alterações no metabolismo e no transporte de  $Ca^{++}$ , atividades enzimáticas, entre outros [30]. Estudos sugerem que, campos elétricos induzidos na ordem de  $10V/m$ , correspondentes a densidades de corrente de  $2Ma/m^2$ , podem exceder o ruído endógeno da membrana e provocar alterações neuroendócrinas na célula [32]. Foi observado, também, que campos elétricos e correntes induzidas acima dos valores endógenos, causam sérios efeitos fisiológicos, à medida que a densidade de corrente induzida aumenta. As pesquisas mostram que densidades de corrente induzidas na faixa de 10 a  $100Ma/m^2$ , podem provocar mudanças nos tecidos e efeitos cognitivos no cérebro. Já valores que excedam 100, ou centenas de  $Ma/m^2$  podem provocar sérios efeitos como extra sístole cardíaca, fibrilação ventricular, tétano muscular e falha respiratória [31]. Ainda não há evidências que campos ELF alterem as estruturas do DNA ou provoquem efeitos mutacionais. Estudos não detectaram quaisquer danos no DNA ou mutações nos cromossomos de células expostas a ELF [20][31]. Porém, a não comprovação da relação entre campos ELF e alterações no DNA, não significa que doenças como o câncer sejam indiferentes à presença dos mesmos. Alguns estudiosos sugerem que os efeitos dos campos ELF estejam ligados mais à proliferação de células geneticamente alteradas do que propriamente causando a lesão inicial.

Alguns estudos mostraram outros efeitos dos campos. Pesquisadores relatam que

os efeitos biológicos mais consistentes são o aparecimento de fosfenos visuais e uma pequena redução do batimento cardíaco, durante ou imediatamente após a exposição aos campos de ELF [9][10][14]. Porém, não há nenhuma evidência de que estes efeitos transitórios acarretem algum risco à saúde a longo prazo.

Outros tentaram relacionar a exposição aos campos de ELF com efeitos fisiológicos, como: a mudança na composição sanguínea e de eletrocardiogramas, número de células e nível de melatonina no sangue, entre outros [14][15][24]. Porém não foi observado nenhum efeito fisiológico adverso que pudesse comprometer a saúde dos voluntários. Houve ainda, a tentativa de relacionar a exposição a campos com possíveis efeitos psicológicos, mas, também, nada foi observado [23].

Estudos similares continuaram sendo realizados obtendo sempre resultados contraditórios. Sabe-se que para uma maior compreensão dos efeitos de campos eletromagnéticos na saúde, experimentos controlados em laboratório devem ser comprovados. Quando os estudos em laboratório são realizados e seus fenômenos observados na prática, pode-se afirmar que existe uma base para relacionar causa e efeito do fenômeno. Em todo o mundo trabalhos deste tipo vêm sendo desenvolvidos com este objetivo.

## 2.5 Efeitos Indiretos e Estudos com Voluntários

As reações das pessoas expostas a campos elétricos e magnéticos são muito subjetivas e dependem de situações particulares. Por exemplo: em algumas pessoas a sensação de cabelos eriçados (*hair stimulation*) pode ocorrer quando se está exposto a campos maiores que  $10kV/m$ , porém para a mesma intensidade de campo, outras pessoas podem não ter a mesma percepção. Outro fato interessante é que sensações como formigamento (*tingling*) e cabelos eriçados, muitas vezes não podem ser relacionadas diretamente com a corrente induzida. Ou seja, a passagem de corrente induzida por campos pelo corpo, não implica no mesmo tipo de percepção pelas pessoas.

Vários estudos tentam associar níveis de campos elétricos às sensações relatadas por pessoas expostas a campos. Um desses estudos contou com a participação de 27 voluntários que tiveram que caminhar sob uma LT de testes, onde eram submetidos a várias condições de campo e tinham suas sensações registradas. As mais comuns relatadas foram a estimulação dos nervos capilares (pêlos eriçados - 80% dos casos) e o formigamento de partes do corpo que estavam em contato com a roupa (64% dos casos).

Contudo, em campos de média e baixa intensidade estas sensações raramente causam problemas. O mais preocupante, mas menos freqüente, foi o surgimento de descargas (*sparks*) entre partes do corpo e a vestimenta. Elas ocorreram em campos da ordem de 15 a  $20kV/m$ . O limiar de percepção (*threshold*) para mais de 10% dos voluntários ficou, também, na faixa de 15 a  $20kV/m$ . Descargas elétricas podem ocorrer quando há aproximação, sem que haja contato, entre dois objetos, ou pessoas, em diferentes potenciais que estejam submetidos a campos de ELF [42].

Outro fato que deve ser considerado, é o relato de sensações dolorosas devido à manipulação de objetos condutores de certo tamanhos, submetidos aos campos elétricos. Esta sensação ocorre quando a pessoa, ou objeto, ou ambos, não estão aterrados [42]. Os campos podem induzir potenciais em pessoas e objetos, fazendo os mesmos ficarem eletricamente carregados. O contato entre pessoas ou objetos em diferentes potenciais, resulta na descarga do objeto, ou da pessoa, através da corrente de contato. O fluxo de corrente elétrica em um indivíduo pode provocar o estímulo de nervos periféricos e de músculos. Dependendo da intensidade dessa corrente pode haver percepção, dor, queimaduras, incapacidade de soltar o objeto, dificuldade para respirar e até fibrilação ventricular [29]. Um estudo relata que 50% dos voluntários masculinos não conseguiu soltar um condutor carregado, para correntes de contato maiores que  $9mA$  à freqüência industrial [38].

Outras pesquisas mostram que apenas uma pequena minoria pode perceber os campos abaixo de  $5kV/m$  na freqüência industrial. Estes mesmos estudos mostram que a maioria das pessoas expostas a campos acima de  $20kV/m$ , podem perceber a presença dos mesmos [32][36].

Sabe-se que campos de ELF intensos podem provocar estímulos de nervos e tecido muscular. Tanto que pulsos com campos desse tipo são utilizados para verificar a integridade de vias nervosas. Uma aplicação de campos pulsantes bastante utilizada hoje em dia é a ressonância magnética. Existem relatos de pessoas submetidas a este exame que tiveram algum músculo periférico estimulado. Estudos com esses tipos de campos mostram que eles podem induzir densidades de corrente de cerca de  $1A/m^2$  em tecidos periféricos, podendo provocar excitação neural e até fibrilação cardíaca [22][29].

## 2.6 Conclusão

Ao longo dos anos tem havido inúmeros relatos de aumento de risco de certos tipos de câncer, tais como: leucemia, tumores de tecidos nervosos, e até câncer de mama entre eletricitários. Na maioria dos estudos, os tipos de trabalho foram utilizados para classificar os indivíduos de acordo com os níveis de exposição presumida a campos magnéticos. Alguns estudos mais recentes, entretanto, têm utilizado métodos mais sofisticados para classificar os indivíduos quanto à exposição. Em geral estes estudos sugeriram um aumento do risco de leucemia ou de tumores cerebrais, mas foram inconsistentes com referência ao tipo de câncer para o qual há aumento de risco. Como parte dos estudos epidemiológicos, boa parte dos estudos com respeito a efeitos na reprodução não proveu evidências consistentes.

Já os dados que relacionam o risco de câncer com a exposição aos campos de ELF, de indivíduos que moram perto de linhas de transmissão, parecem ser consistentes ao indicar um pequeno aumento de risco de leucemia em crianças, apesar de estudos mais recentes questionarem essa associação. Observa-se também, que os mesmos estudos não indicam um risco, da mesma forma elevado, de qualquer outro tipo de câncer infantil ou em adultos. A causa básica para a ligação hipotética entre a leucemia infantil e o fato de residir nas proximidades de linhas de transmissão é desconhecida. Acredita-se que fatores ainda desconhecidos para a causa de leucemia teriam que estar relacionados com as linhas. Contudo, ainda não se tem estudos de laboratório satisfatórios, que comprovem tal associação.

Mesmo com todos questionamentos quanto aos riscos de exposição a campos de ELF alguns órgãos definiram limites de exposição. No capítulo seguinte são mostrados os limites estabelecidos pelos principais órgãos do setor.

# 3

## LIMITES DE EXPOSIÇÃO - NORMAS

### 3.1 Introdução

Organizações nacionais e internacionais vêm formulando regulamentações tentando estabelecer limites para exposição de pessoas a campos elétricos e magnéticos, seguindo a crescente preocupação da população quanto a possíveis efeitos prejudiciais desses campos à saúde.

Podemos separar as regulamentações existentes em duas linhas principais. A primeira, compreende as regulamentações emitidas por órgãos governamentais na forma de leis e decretos. Nessas, são levados em conta aspectos de natureza política, social, econômica além da pressão popular no que tange a um "sentimento de risco" da mesma. A segunda, engloba regulamentações publicadas pelos órgãos normativos nacionais e internacionais. Estas são baseadas em diretrizes técnicas e têm seus limites alicerçados em evidências e constatações científicas.

As normas elaboradas por comitês e entidades como: a ABNT, ICNIRP e IEC geralmente, são recomendações e, por tanto, não são de aplicação obrigatória. Porém, as mesmas são utilizadas pelos governos como base de referência para criação das leis e decretos, estes sim, de caráter obrigatório. Estas normas também servem de base para a justiça, na aplicação de sanções quando da ocorrência de acidentes, decorrentes do não cumprimento das normas. A tendência é que as leis e decretos sejam mais rígidos que a própria recomendação. Isso ocorre muitas vezes para atender o anseio da população que, na sua maioria desinformada, cobra providências às instituições

governamentais.

Em vista disso, neste capítulo serão expostos os principais conceitos utilizados para determinação dos limites de exposição, além de, um breve resumo das principais regulamentações nacionais e internacionais que tratam da exposição a campos eletromagnéticos.

### 3.2 Restrições básicas e Níveis de referência

As restrições básicas são baseadas em efeitos conhecidos e comprovados à saúde humana, devido exposição a campos elétricos e magnéticos. As principais grandezas utilizadas para especificar as restrições básicas são: a densidade de corrente ( $J$ ) e a taxa de absorção específica ( $SAR$ ) [7]. A proteção contra efeitos prejudiciais à saúde depende do cumprimento dessas restrições básicas.

Os níveis de referência, ou limites de exposição, têm a finalidade prática de avaliar se com a exposição humana a campos há possibilidade das restrições básicas serem superadas. Na verdade, são extrapolações das grandezas físicas utilizadas nas restrições básicas em outras grandezas físicas. Por exemplo, como a medição da densidade de corrente no corpo humano é muito difícil de ser realizada, podem ser feitas extrapolações dessa grandeza para outras de fácil medição, como o campo elétrico e a densidade de fluxo magnético. Deve-se entender os níveis de referência, como sendo, valores médios espaciais calculados sobre o corpo inteiro do indivíduo exposto, com a importante condição de que, as restrições básicas para exposição localizada não sejam excedidas. A concordância com todos os níveis de referência, garante a concordância com as restrições básicas [7].

### 3.3 Limites para Exposição Ocupacional e Público em Geral

A população ocupacional, excepcionalmente exposta a campos, compreende adultos que estão geralmente expostos a condições conhecidas e são treinados para estar atentos ao risco potencial e tomar as precauções apropriadas. Ou seja, estes indivíduos estão cientes dos riscos envolvidos e cuidados a serem tomados quanto da exposição a campos elétricos e magnéticos.

Já o público em geral consiste de pessoas de todas as faixas etárias e estados de

saúde variados que pode incluir grupos ou indivíduos particularmente suscetíveis a efeitos da exposição aos campos de ELF. Em geral essas pessoas não sabem que estão expostas a campos e por isso não tomam as devidas precauções. Por esse motivo é que se adotam restrições mais rigorosas para exposição do público em geral do que para o ocupacional [7].

### 3.4 IEC

A IEC - *International Electrotechnical Commission* - fundada em Londres em 1906, recentemente criou novos comitês para avaliação de campos elétricos e magnéticos associados à exposição humana. O comitê técnico criado - "metodologia para avaliação de campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos associados à exposição humana" - objetiva normatizar métodos de medição e avaliar a exposição humana a campos elétricos magnéticos e eletromagnéticos até  $300GHz$ , mas foca em estabelecer limites de exposição e métodos de mitigação dos campos.

As principais atribuições da comissão são:

- Caracterizar o ambiente eletromagnético considerando a exposição humana;
- Elaborar métodos, instrumentação e procedimentos de medição;
- Elaborar métodos de cálculo e de avaliação de exposição produzida por fontes específicas.

### 3.5 CENELEC

O Comitê Europeu para Normalização Eletrotécnica - CENELEC - é uma organização sem fins lucrativos fundada no início da década de setenta. Ele é reconhecido como a organização de normatização da Europa no campo da eletrotécnica pela Comissão Européia. Em 1995 o CENELEC apresentou em um documento intitulado: "*Human exposure to electromagnetic fields, low-frequency (0 a 10kHz)*", estabelecendo limites de exposição a campos baseados em efeitos de curta duração relacionados à densidade de corrente induzida pelos campos no corpo humano e seus efeitos no sistema nervoso. Devido à grande dificuldade de medição da densidade de corrente no corpo humano, as grandezas utilizadas para o estabelecimento de limites foram o campo elétrico e a

densidade de fluxo magnético. De posse dessas grandezas e com ajuda de modelagem matemática do corpo humano é que se obteve a densidade de corrente através do corpo. Abaixo segue uma tabela com os limites estabelecidos pelo CENELEC [43].

Tabela 3.1: Limites CENELEC (60Hz)- Norma ENV 50166-1.

Valores Limites	Intensidade E [kV/m]	Intensidade H [A/m]	Fluxo B [ $\mu T$ ]
Ocupacional	25*	1060,80	1333
Público em Geral	8,33	424,15	533

1. \* com restrição de tempo de exposição.

### 3.6 IEEE

O IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers* - é uma entidade sem fins lucrativos que chega a abranger mais de 380 mil membros em 150 países. É considerada uma autoridade líder em áreas técnicas como: eletrotécnica, engenharia de computadores, tecnologia aeroespacial, entre tantas outras. O IEEE publicou em 2002 a revisão do *standard C95.6 - "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 – 3kHz[44]"* - a partir de análise do comitê "*IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (Standards Coordinating Committee 28) on Non-Ionizing Radiation*". Essa norma foi alicerçada na avaliação da literatura científica tomando como referência apenas os efeitos comprovados incluindo os limiares de percepção. Os limites de campos foram obtidos a partir dos limites de densidade de corrente ou campos internos. Na Tabela 3.2 são listados os limites de exposição de campos determinados pelo IEEE [44].

Tabela 3.2: Limites IEEE (60Hz)- Norma C95.6

Valores Limites	Intensidade E [kV/m]	*Intensidade H [A/m]	*Fluxo B [ $\mu T$ ]
Ocupacional	20	2156,50	2710
Público em Geral	5	719,38	904

1. \* valores de exposição para a cabeça e torso.

### 3.7 ICNIRP

A *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* - ICNIRP - é uma organização não-governamental, constituída por cientistas de diversos países e reconhecida pela OMS - Organização Mundial de Saúde - fundada no início da década de noventa em substituição da INIRC - *International Radiation Protection Association* - com o objetivo de ser uma organização científica internacional independente. A ICNIRP tem por objetivo investigar os perigos das radiações não-ionizantes, desenvolvendo diretrizes e aspectos de proteção sobre os limites de exposição a essas radiações.

Em 1998 a ICNIRP publicou a revisão do artigo "*Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic fields (up to 300 GHz)*". Essas diretrizes foram baseadas em uma revisão detalhada da literatura sob o assunto. Foram considerados nessa norma efeitos térmicos e não térmicos, oriundos da exposição humana a campos. Nesse documento, são definidos os limites de exposição humana a campos elétricos e magnéticos para frequências de 0 a 300GHz. Em 2001 foi realizada uma nova revisão da literatura, mas os limites estabelecidos anteriormente foram mantidos. Para esta norma somente os efeitos estabelecidos, comprovados, foram utilizados como base para as restrições das exposições propostas. Ou seja, as diretrizes adotadas foram baseadas em efeitos de caráter imediato, a curto prazo, como estimulação dos nervos periféricos e músculos, choques e queimaduras tendo por causa o contato com objetos condutores, e elevação de temperatura nos tecidos devido à absorção de energia durante exposição a campos eletromagnéticos. Com respeito aos efeitos potenciais da exposição a longo prazo, como aumento do risco de câncer, a ICNIRP concluiu que os dados disponíveis são insuficientes para prover uma base e fixar restrições à exposição. Muito embora, pesquisas epidemiológicas, tenham produzido evidências sugestivas associando efeitos carcinogênicos com exposição a campo magnético de 50/60Hz em níveis substancialmente inferiores aos recomendados, essas evidências não foram convincentes ao ponto de serem levadas em consideração.

A ICNIRP estabeleceu restrições básicas na densidade de corrente para evitar efeitos em funções do sistema nervoso para campos entre 1Hz e 10MHz. Com o objetivo de fornecer o máximo de proteção, os níveis de referência adotados pela ICNIRP foram dados para a condição de acoplamento máximo. Nos estudos realizados em laboratório com células e animais, observou-se que estando a densidade de corrente abaixo de

$10mA.m^{-2}$ , não havia nenhuma evidência fundamentada que indicasse efeitos prejudiciais a saúde dos campos de baixa frequência. Porém, em níveis mais elevados de densidade de corrente puderam-se observar efeitos mais significativos em tecidos [31]. Na faixa de frequência de poucos  $Hz$  a  $1kHz$  e em níveis de densidade de corrente induzida superiores a  $100mA.m^{-2}$ , são excedidos os limiares para mudanças na excitabilidade do sistema nervoso central e para outros efeitos agudos no organismo. Tendo em vista as condições de segurança, foi decidido que para frequências na faixa de  $4Hz$  a  $1kHz$ , a exposição ocupacional deve ser limitada a campos que induzem densidades de corrente menores que  $10mA.m^{-2}$ . Ou seja, foi aplicado um fator de segurança de 10. Já no caso do público em geral houve a necessidade de adotar um fator de segurança maior. Assim, foi acrescido um fator de cinco em cima do adotado para a exposição ocupacional, o que resultou em uma restrição básica de  $2mA.m^{-2}$ . Essas restrições podem ser vistas, de forma resumida na Tabela 3.3 [7] [45].

Tabela 3.3: Restrições básicas para campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo.

Exposição	Faixas de frequências	Densidade de Corrente [ $mA/m^2$ ]
Ocupacional	Até 1 $Hz$	40
	1 - 4 $Hz$	$40/f$
	4 $Hz$ - 1 $kHz$	10
	1 - 100 $kHz$	$f/100$
Público em Geral	Até 1 $Hz$	8
	1 - 4 $Hz$	$8/f$
	4 $Hz$ - 1 $kHz$	2
	1 - 100 $kHz$	$f/500$

1.  $f$  é a frequência em Hertz.
2. A densidade de corrente,  $J$ , é o valor eficaz para cabeça e tronco.
3. Devido a inhomogeneidade elétrica do corpo, as densidades de corrente devem ser calculadas pela média sobre uma seção transversal de  $1cm^2$  perpendicular à direção da corrente
4. Para frequências até  $100kHz$ , valores de pico da densidade de corrente podem ser obtidos multiplicando-se o valor eficaz por  $\sqrt{2}$ . Para pulsos de duração  $t_p$ , a frequência equivalente a ser usada nas restrições básicas deve ser calculada por  $f = \frac{1}{2t_p}$ .
5. Para frequências até  $100kHz$  e para campos magnéticos pulsados, a densidade de corrente máxima associada aos pulsos pode ser calculada pelos tempos de subida/descida e o máximo da variação, no tempo, densidade de fluxo magnético.
6. Para campos acima de  $100kHz$  além da densidade de corrente teremos a SAR como outra restrição básica.

Com relação aos níveis de referência adotados pela ICNIRP, sabe-se que a densidade de corrente induzida é inversamente proporcional à seção transversal do corpo e pode ser relativamente alta no pescoço e nos tornozelos. Por exemplo, um nível de exposição

de  $5kV/m$  para exposição do público em geral, corresponde, nas piores condições, a uma densidade de corrente induzida de quase  $2mA.m^{-2}$  no pescoço e no tronco, se o campo for paralelo ao eixo do corpo [8]. Um fato importante é que de forma a demonstrar concordância com as restrições básicas, os níveis de referência para campos elétricos e magnéticos devem ser considerados separadamente e não aditivamente. Faz-se isso, pois, para fins de proteção, as correntes induzidas por campos elétricos e magnéticos não são aditivas. Na faixa de frequências até  $1kHz$ , os níveis de referência para campos elétricos, do público em geral, são a metade dos valores estabelecidos para exposição ocupacional. O valor de  $8,310kV/m$  para uma exposição ocupacional em  $60Hz$ , inclui uma margem de segurança suficiente para prevenir efeitos de estimulação por correntes de contato, sob todas as condições possíveis. Sendo assim para o público em geral foi definido o valor de  $4,2kV/m$  em  $60Hz$ . Os níveis de referência adotados pela ICNIRP podem ser vistos, resumidamente, nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4: Níveis de referência para exposição ocupacional a campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo.[7]

Faixas de frequências	Intensidade E [ $kV/m$ ]	Intensidade H [ $A/m$ ]	Fluxo B [ $\mu T$ ]
Até $1 Hz$	–	$1,63 \times 10^5$	$2 \times 10^5$
$1 - 8 Hz$	20000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$
$8 - 25 Hz$	20000	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^4 / f$
$0,025 - 0,82 kHz$	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$
$0,82 - 65 kHz$	610	24,4	30,7

1.  $f$  conforme indicado na coluna de faixas de frequência.
2. Valores eficazes, não perturbados.
3. Os valores de campos podem ser excedidos, desde que sejam obedecidas as restrições básicas e sejam excluídos efeitos indiretos adversos.
4. Para campos acima de  $10MHz$  além da densidade de corrente teremos a SAR como outra restrição básica.

Tabela 3.5: Níveis de referência para exposição do público em geral a campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo.[7]

Faixas de frequências	Intensidade E [ $kV/m$ ]	Intensidade H [ $A/m$ ]	Fluxo B [ $\mu T$ ]
Até 1 $Hz$	—	$3,2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$
1 - 8 $Hz$	10000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$
8 - 25 $Hz$	10000	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^3/f$
0,025 - 0,8 $kHz$	$250/f$	$4/f$	$5/f$
0,8 - 3 $kHz$	$250/f$	5	6,25

1.  $f$  conforme indicado na coluna de faixas de frequência.
2. Valores eficazes, não perturbados.
3. Os valores de campos podem ser excedidos, desde que sejam obedecidas as restrições básicas e sejam excluídos efeitos indiretos adversos.
4. Para campos acima de  $10MHz$  além da densidade de corrente teremos a SAR como outra restrição básica.

### 3.8 Normas Brasileiras

No Brasil, existem algumas publicações que tratam desse assunto. A norma NBR 5422 - "Projeto de Linhas Aéreas De Transmissão de Energia Elétrica" de 1985, publicada pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, estabelece no item 12.5.1 que: "O valor do campo elétrico ao nível do solo, no limite da faixa de segurança, não deve ultrapassar  $5kV/m$ ". Já a NR-9, uma norma regulamentadora de segurança e saúde do trabalho voltada ao público ocupacional, dispõe no item 9.3.5.1c que, para avaliação de exposição a riscos ambientais, devem ser considerados os limites dispostos na NR-15 - "atividades e operações insalubres". Porém, esta não considera insalubres as atividades realizadas pelos trabalhadores de redes e subestações elétricas, além de não fixar limites para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência industrial.

Outra publicação, de outubro de 2006, é uma proposta para a NBR-15145 - "Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 e  $60Hz$ ", não define o limite de exposição para o público ocupacional, pois, diz tratar-se de responsabilidade do Ministério do Trabalho e Emprego nas suas normas regulamentadoras. Na proposta da NBR-15145, utilizou-se como referência os valores sugeridos pela ICNIRP para definição dos limites de exposição do público geral, em torno das instalações de geração transmissão e distribuição. De forma a simplificar a visualização ,podemos montar a tabela a seguir, para campos de  $60Hz$  a partir da

Tabela 3.5 [43].

Tabela 3.6: Limites propostos pela NBR 15145 (60Hz)

Valores Limites	Intensidade E [ $kV/m$ ]	Intensidade H [ $A/m$ ]	Fluxo B [ $\mu T$ ]
Público em Geral	4,16	66,67	83,33

### 3.9 Princípio da Precaução

Um dos conceitos mais utilizados, principalmente na elaboração de leis e decretos, é o princípio da precaução. Redigido durante a conferência da Organização das Nações Unidas - ONU - sobre o meio ambiente e desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, rege que: "De modo a proteger o meio ambiente, o princípio da precaução deve ser amplamente observado pelos Estados, de acordo com suas capacidades. Quando houver ameaça de danos sérios ou irreversíveis, a ausência de absoluta certeza científica não deve ser utilizada como razão para postergar medidas eficazes e economicamente viáveis para prevenir a degradação ambiental" [43].

Outras instituições também elaboraram o seu próprio princípio da precaução, baseados no redigido pela ONU. Por exemplo, no mesmo ano, na Holanda, o artigo 174 do tratado da União Européia estabelece o princípio da precaução como sendo: "Tomar ações prudentes quando houver evidência científica suficiente (mas não necessariamente prova absoluta) que a falta de ação possa causar danos e onde a ação possa ser justificada com razoável avaliação de custo-efetividade" [43].

Esse princípio é aplicado quando existe alto grau de incerteza científica, a fim de se evitar riscos potenciais, sem que haja necessidade de esperar novos resultados. Acontece que os governos, muitas vezes pressionados pela opinião popular, adotam o princípio sem critérios claros. A utilização indiscriminada do princípio da incerteza pode provocar a perda de credibilidade das diretrizes e limites fundamentais em estudos científicos. A OMS vem analisando, com cuidado, essa aplicação e elaborou um documento - "*Precaution framework for public health protection*" - criando uma "estrutura de precaução" que tem os seguintes objetivos [43]:

- Antecipar possíveis ameaças à saúde e responder apropriadamente, de forma a reduzir exposições antes da introdução de um novo agente físico, químico ou bi-

ológico.

- Cuidar das preocupações públicas envolvendo um problema de saúde em potencial ou percebido, mas não comprovado, despertado após a introdução de um agente.

Essa estrutura ainda diz que:

- Na ausência de informação científica completa, a estrutura de precaução não é uma base para substituir diretrizes científicas existentes. Todas as diretrizes internacionais (e muitas nacionais), sobre os limites de exposição humanas, são baseadas em resultados e pesquisas de efeitos sobre a saúde que são consistentes, reproduzíveis, confirmados por diferentes laboratórios e identificam claramente níveis de exposição a agentes físicos, químicos ou biológicos nocivos aos seres humanos. Adicionalmente, os limites de exposição incorporam fatores de segurança que toleram incertezas em qualquer limiar identificado para efeitos estabelecidos.
- Não é apropriado para ampliação ou desenvolvimento de diretrizes. Onde existirem diretrizes estabelecidas, é importante que suas bases científicas não sejam enfraquecidas pelo emprego da estrutura de precaução para dar suporte a redução arbitrária dos limites de exposição.

### 3.10 Conclusão

Vemos que os limites de exposição não são fáceis de serem definidos. Basta fazer uma comparação entre as tabelas apresentadas das diferentes organizações. Os limites são estabelecidos baseados em efeitos de curto prazo da exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência industrial. Ainda existe certo grau de incerteza quanto aos efeitos de longo prazo da exposição. Ao mesmo tempo, não podemos cometer o erro de querer aplicar o princípio da precaução de forma exagerada.

Sendo assim, podemos aplicá-lo de modo criterioso e simples da seguinte forma:

- Como, no Brasil, não existe norma que defina os limites de exposição ocupacional, serão adotados os limites estabelecidos na ICNIRP. Tendo em vista que os limites de exposição do público geral, que consta na proposta de norma NBR-15145 foram tirados da ICNIRP.

- Qualquer ação que venha propor a mitigação dos campos elétricos e magnéticos de forma objetiva e com custo-efetividade baixo, irá contribuir para a minimização de possíveis efeitos ainda não comprovados da exposição humana prolongada a campos elétricos e magnéticos na frequência industrial.

Ou seja, a minimização de campos elétricos e magnéticos produzidos por linhas de transmissão vem contribuir efetivamente a fim de mitigar um problema que necessita de uma solução conciliadora, atendendo aos anseios da sociedade por mais energia e conforto sem que haja prejuízo à saúde ou meio ambiente.

Os valores limites adotados retirados das Tabelas 3.4 e 3.5, substituindo-se a frequência do sistema brasileiro ( $60Hz$ ), estão na tabela abaixo:

Tabela 3.7: Limites de campos adotados neste trabalho.

Valores Limites	Intensidade E [ $kV/m$ ]	Intensidade H [ $A/m$ ]	Fluxo B [ $\mu T$ ]
Ocupacional	8,33	333,33	416,67
Público em Geral	4,16	66,67	83,33

De posse dos limites a serem obedecidos, o capítulo seguinte explana sobre os métodos de cálculo de campos elétricos e magnéticos de LT utilizados juntamente com uma breve introdução sobre otimização de campos.

# 4

## CÁLCULO E OTIMIZAÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS ORIUNDOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

### 4.1 Introdução

Ao longo dos anos, várias técnicas para o cálculo de campos elétricos e magnéticos foram desenvolvidas, entre elas destacam-se: TLM - *Transmission Line Modeling*, aplicada para o cálculo de campos em alta frequência; FEM - *Finite Element Modeling*, aplicadas no cálculo de campos para objetos e superfícies de geometria complexas. Nesse capítulo são descritos os métodos numéricos para o cálculo de campo elétrico e magnético utilizados nesse trabalho, bem como sua utilização para a minimização dos campos abaixo de uma linha de transmissão [40].

### 4.2 Cálculo de Campos abaixo de Linhas de Transmissão

Devido a sua baixa frequência (50/60 Hz), os campos elétricos e magnéticos gerados por uma linha de transmissão podem ser considerados como quase estáticos, sendo seus cálculos determinados por técnicas de campo estático (DC). Os vetores de campo DC são constantes em cada posição do espaço, sendo que para tensões monofásicas alternadas o vetor campo alterna sua direção. Esta é uma representação simples de vetores fasoriais tomando como base a teoria de campo estático. Para tensões trifásicas alternadas, os vetores de campo giram em praticamente todos os lugares, exceto, nas fronteiras, como por exemplo, o plano superficial da terra. A intensidade do campo

pode ter mudanças significativas de fase que devem ser consideradas quando há a interação de campos que possuam defasagem fasorial entre si. Em uma linha de transmissão, as componentes verticais de quadratura, normalmente cancelam uma a outra e são menores que dez por cento das componentes do eixo principal, horizontais [2].

O entendimento dos vetores de campos elétrico e magnético e suas componentes é imprescindível para compreensão dos cálculos de campos eletromagnéticos. Nesta situação existem quatro parâmetros a serem descritos; dois fasores em cada uma das duas dimensões, horizontal e vertical. Dessa forma, os campos elétrico e magnético podem ser descritos de três maneiras [2].

1. O campo tem uma componente espacial na direção horizontal e outra na vertical. Cada uma com uma parte real e imaginária ou módulo e fase;
2. O campo tem uma parte real com um vetor tendo módulo com direção espacial e fase, e uma parte imaginária com um vetor tendo módulo com direção espacial e fase.
3. Uma descrição útil, embora não seja uma descrição completa é o vetor campo localizado em uma elipse. Esse é definido por seu módulo de eixo principal e ângulo direcional, e seu módulo de eixo secundário.

Neste trabalho foram utilizadas as Leis de Ampere e Coulomb para os cálculos de campo magnético e elétrico. Nesses métodos, decompõe-se os vetores de campo em componentes horizontal e vertical, tendo cada uma partes real e imaginária. Sendo assim, a primeira descrição é a que mais se adequa aos métodos utilizados.

O cálculo dos campos se torna complexo devido aos aspectos práticos das instalações como: a flecha dos condutores, proximidade das estruturas, superfície desigual do solo, condutividade finita do solo, entre outros. Como o foco do trabalho está na utilização da formulação desses cálculos para sua minimização, alguns desses aspectos práticos podem ser deixados em segundo plano, sem que haja comprometimento dos resultados e da metodologia proposta [4] [3] [6] [2]. Para isso, serão feitas algumas considerações gerais para o cálculo dos campos elétricos e magnéticos, que são descritas a seguir:

1. Os condutores são cilindros lisos infinitamente longos paralelos um ao outro e à terra;

2. A influência de torres ou objetos vizinhos à linha de transmissão será desconsiderada;
3. Para análise da pior condição, a altura do condutor acima do solo é tomada como o valor mínimo conforme Equação 4.1 e Figura 4.1;

$$Y_{min} = Y_{max} - flecha \quad (4.1)$$

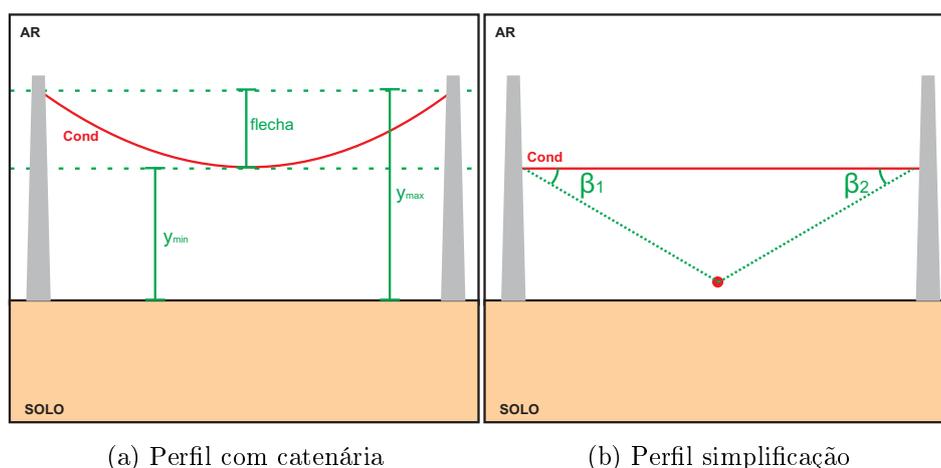


Figura 4.1: Representação da simplificação de um vão de linha considerando o condutor como sendo paralelo ao solo.

A primeira consideração simplifica de forma significativa a geometria do problema. Com o condutor infinito e paralelo à terra como mostrado na Figura 4.1(b), o cálculo de campo magnético pode ser realizado através da Lei de Ampere sem muitas dificuldades, pois os ângulos  $\beta_1$  e  $\beta_2$  tenderão a zero, simplificando a Equação 4.2 e fazendo com que a mesma fique no formato da Equação 4.5.

$$\vec{H}_1 = \frac{I_1}{2\pi d_1} [\cos(\beta_1) - \cos(-\beta_2)] \vec{a}_\varphi \quad (4.2)$$

Ainda da primeira consideração, quando feita uma seção transversal dos condutores, como mostrado na Figura 4.2(b), podemos calcular o campo elétrico em um determinado ponto através da Lei de Coulomb, considerando a existência de uma carga pontual localizada do eixo do condutor.

O fato de adotar a Lei de Ampere e de Coulomb para o cálculo de campos magnético e elétrico, respectivamente, ainda traz uma grande vantagem que é a similaridade entre

as expressões de campos utilizadas. Isso traz uma facilidade de formatação dessas expressões na linguagem AMPL, utilizada para montar os problemas de otimização.

A última consideração é de fundamental importância; enquanto que, no cálculo de parâmetros de linha, é adotada uma altura média dos condutores, pois dessa forma se compensa a variação da altura dos condutores ao longo da linha, o mesmo não poder ser feito para o cálculo de campos. A utilização de uma altura média dos condutores para o cálculo de campos pode se tornar um erro, pois a maior contribuição do campo abaixo de uma linha de transmissão vem da posição dos condutores que cortam o plano de seção transversal, onde está o ponto de medição ou de cálculo, conforme apresentado nas figuras 4.2(a) e 4.2(b). Isso se deve ao fato dos campos elétricos e magnéticos terem características radial e circular, respectivamente, em torno de um condutor [6].

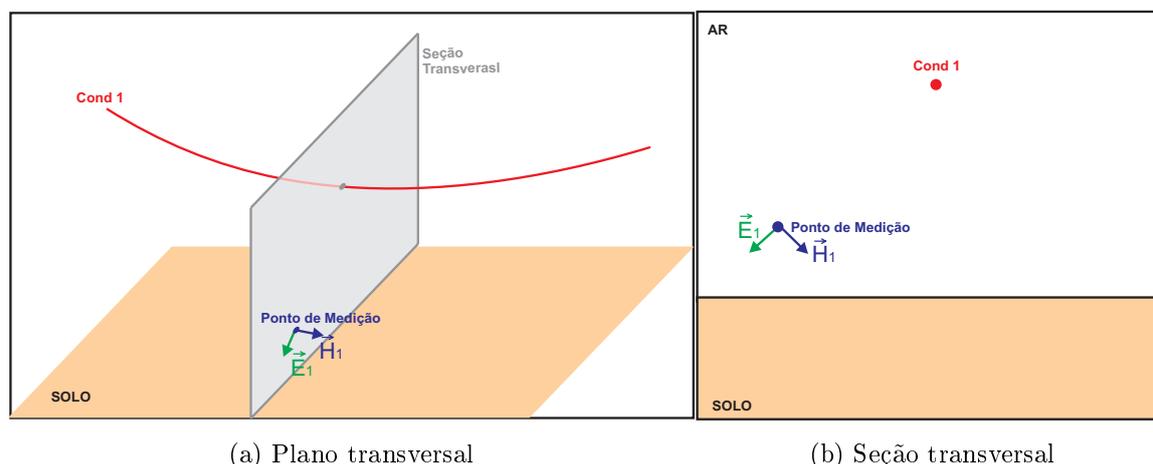


Figura 4.2: Representação da vista lateral e seção transversal de um condutor suspenso.

### 4.3 Cálculo de campo magnético pela Lei de Ampere

Antes de entrar no cálculo de campo magnético alguns conceitos básicos devem ser lembrados:

- Intensidade de campo magnético ( $H$ ), dada em Ampere por metro:
- Densidade de fluxo magnético, dada em Tesla:

$$B = \mu H \quad (4.3)$$

Onde:

$\mu$  é a permissividade do meio, dada em Henry por metro.

De posse desses conceitos, algumas considerações e observações foram feitas:

1. As correntes que passam pelo condutor são constantes e equilibradas.
2. A permissividade relativa do ar ( $\mu_r$ ), para fins práticos pode ser considerada unitária. Dessa forma, a permissividade do meio ( $\mu$ ) pode ser aproximada à do vácuo ( $\mu_0$ ):

$$\mu = \mu_r \mu_0 = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad (4.4)$$

3. O plano da imagem dos condutores está a uma profundidade  $P$  a partir da superfície do solo. Esta consideração será detalhada posteriormente na seções 4.3.2 e 4.4.2.

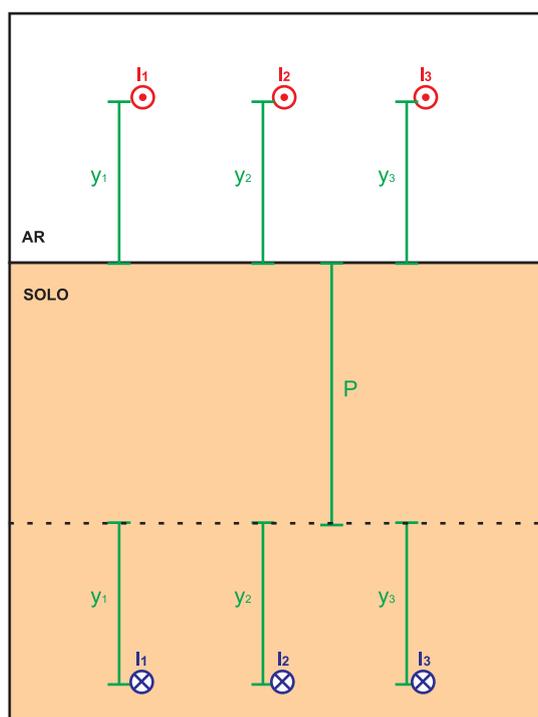


Figura 4.3: Representação dos condutores e suas respectivas imagens no cálculo de campo magnético

4. Linhas que utilizem feixes de condutores terão a corrente em cada condutor definida por um divisor de corrente entre os condutores de uma mesma fase;
5. As correntes nos cabos pára-raios serão consideradas nulas.

### 4.3.1 Intensidade de Campo Magnético em um ponto $p(x, y)$ devido à corrente $I_i$ de um condutor no ponto $(x_i, y_i)$

Como dito anteriormente, os condutores serão considerados infinitos e paralelos à terra. A intensidade de campo magnético em um ponto  $p$ , gerada pela corrente passando em um condutor infinito, como mostrado na Figura 4.4, será dada pela Equação 4.5 [41]:

$$\vec{H}_1 = \frac{I_1}{2\pi d_1} \vec{a}_\varphi \quad (4.5)$$

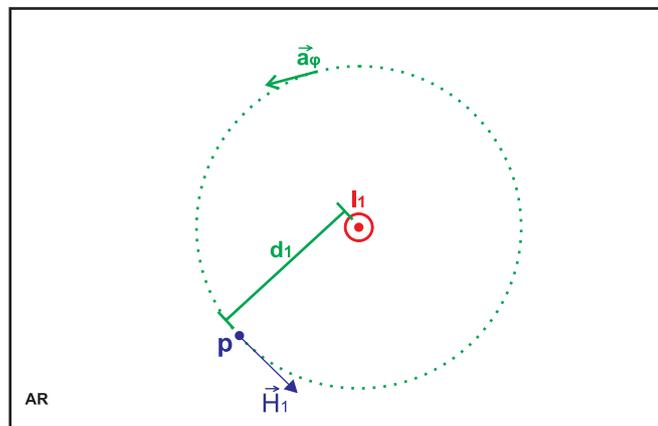


Figura 4.4: Representação do campo magnético no ponto  $p$  distante de  $d_1$  de um condutor pelo qual está passando uma corrente  $I_1$ .

Para facilitar os cálculos futuros, faz-se a decomposição de  $(\vec{H}_1)$  em componentes horizontal  $(\vec{H}_{1h})$  e vertical  $(\vec{H}_{1v})$ , conforme apresentado na Figura 4.5 e explicitado nas equações 4.6 e 4.7.

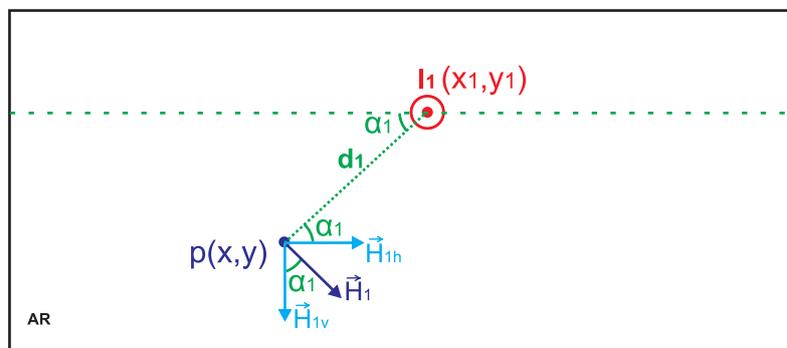


Figura 4.5: Representação do vetor intensidade de campo  $\vec{H}_1$  e suas componentes horizontal  $(\vec{H}_{1h})$  e vertical  $(\vec{H}_{1v})$ .

$$\vec{H}_{1h} = H_1 \text{sen}(\alpha_1) \vec{a}_h = \frac{I_1}{2\pi d_1} \text{sen}(\alpha_1) \vec{a}_h \quad (4.6)$$

$$\vec{H}_{1v} = H_1 \text{cos}(\alpha_1) \vec{a}_v = \frac{I_1}{2\pi d_1} \text{cos}(\alpha_1) \vec{a}_v \quad (4.7)$$

Onde:

$$d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (4.8)$$

$$\text{sen}(\alpha_1) = \frac{(y - y_1)}{d_1} = \frac{(y - y_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}} \quad (4.9)$$

$$\text{cos}(\alpha_1) = \frac{(x - x_1)}{d_1} = \frac{(x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}} \quad (4.10)$$

Substituindo os valores de  $d_1$ ,  $\text{sen}(\alpha_1)$  e  $\text{cos}(\alpha_1)$  nas equações 4.6 e 4.7 tem-se:

$$\vec{H}_{1h} = \frac{I_1}{2\pi d_1} \frac{(y - y_1)}{d_1} \vec{a}_h = \frac{I_1}{2\pi} \frac{(y - y_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \vec{a}_h \quad (4.11)$$

$$\vec{H}_{1v} = \frac{I_1}{2\pi d_1} \frac{(x - x_1)}{d_1} \vec{a}_v = \frac{I_1}{2\pi} \frac{(x - x_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \vec{a}_v \quad (4.12)$$

#### 4.3.2 Presença do Solo e Condutores Imagem

Por se tratar de correntes alternadas considerando o retorno pela terra, como dito anteriormente, o plano dos condutores imagem estará a uma profundidade  $P$  dependente da frequência da corrente que está passando pelo condutor e da resistividade do solo. Isso ocorre devido à capacidade de penetração dos campos magnéticos. Existem várias maneiras de calcular o valor de  $P$  [3][5]. Para o objetivo desse trabalho será utilizado um dos métodos mais conhecidos, o de Carson [5]. Neste,  $P$  é dada pela Equação 4.13.

$$P = 658,5 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4.13)$$

Onde:

$\rho$  é a resistividade do solo [ $\Omega m$ ]

$f$  é a frequência da corrente [Hz]

Sabe-se que a resistividade do solo varia ao longo de uma linha de transmissão. Isso ocorre, devido a heterogeneidade do solo e à umidade presente. Como a resistividade do solo influi diretamente no cálculo do campo magnético, adotou-se esta como sendo  $100\Omega m$ , por ser um valor médio de resistividade geralmente aplicado para o cálculo de campos [3][2]. Valores de resistividade do solo maiores que esse fazem crescer o valor de  $P$ , provocando pouca ou nenhuma variação no perfil de campo da linha. Isto pode ser observado na Tabela 4.1, onde é mostrada a variação do valor máximo da intensidade de campo magnético para uma variação de dez vezes no valor da resistividade do solo.

Tabela 4.1: Comparação dos valores máximos de campo magnético para uma linha de  $69kV$  tipo H carregada com uma corrente de  $300A$  para valores diferentes de resistividade do solo.

$\rho$ [ $\Omega m$ ]	$P$ [ $m$ ]	$H_{max}$ [ $A/m$ ]
100	850,12	4,8547
1000	2688,30	4,8550

Sendo assim, considerando a presença do solo no cálculo, tem-se a representação dos campos  $\vec{H}_1$ , gerado pela corrente passando no condutor real, e  $\vec{H}'_1$ , gerado pela corrente passando no condutor imagem, conforme apresentado na Figura 4.6.

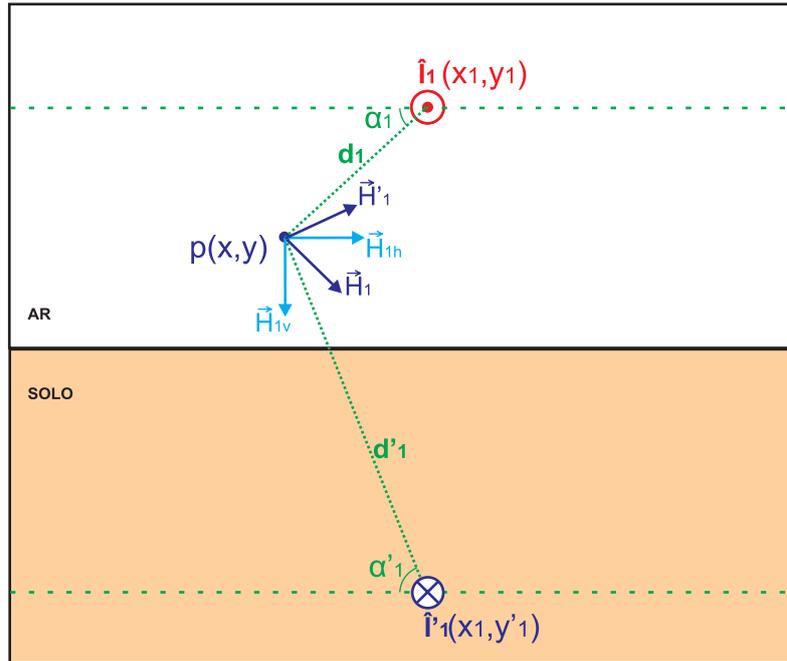


Figura 4.6: Representação do vetor intensidade de campo  $\vec{H}_1$  e suas componentes considerando a presença do solo

Onde a profundidade do condutor imagem  $y'_1$  e a distância  $d'_1$ , do mesmo ao ponto  $p(x, y)$  são, respectivamente:

$$y'_1 = P + y_1 \quad (4.14)$$

$$d'_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y + y'_1)^2} \quad (4.15)$$

E assim, os  $\text{sen}(\alpha'_1)$  e  $\text{cos}(\alpha'_1)$  serão dados, respectivamente, por:

$$\text{sen}(\alpha'_1) = \frac{(y + y'_1)}{d'_1} = \frac{(y + y'_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y + y'_1)^2}} \quad (4.16)$$

$$\text{cos}(\alpha'_1) = \frac{(x - x_1)}{d'_1} = \frac{(x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y + y'_1)^2}} \quad (4.17)$$

De forma a facilitar entendimentos posteriores, lembrando que, o objetivo deste trabalho é minimizar os campos oriundos de linhas de transmissão, e que estas transmitem correntes alternadas que possuem defasagens, consideram-se as correntes da Figura 4.6 possuidoras de defasagem angular. Como a intensidade de campo depende diretamente

da corrente, as componentes da intensidade na direção horizontal e vertical serão vetores compostos pela soma de dois fasores, um devido à corrente do condutor real e o outro da corrente do condutor imagem.

$$\vec{H}_{1h} = \hat{H}_1 \text{sen}(\alpha_1) \vec{a}_h + \hat{H}'_1 \text{sen}(\alpha'_1) \vec{a}_h \quad (4.18)$$

$$\vec{H}_{1v} = \hat{H}_1 \text{cos}(\alpha_1) \vec{a}_v + \hat{H}'_1 \text{cos}(\alpha'_1) \vec{a}_v \quad (4.19)$$

Lembrando que a corrente do condutor imagem está no sentido oposto à do condutor real, tem-se [3]:

$$\vec{H}_{1h} = \frac{\hat{I}_1}{2\pi} \left[ \frac{\text{sen}(\alpha_1)}{d_1} - \frac{\text{sen}(\alpha'_1)}{d'_1} \right] \vec{a}_h \quad (4.20)$$

$$\vec{H}_{1v} = \frac{\hat{I}_1}{2\pi} \left[ \frac{\text{cos}(\alpha_1)}{d_1} - \frac{\text{cos}(\alpha'_1)}{d'_1} \right] \vec{a}_v \quad (4.21)$$

Substituindo as equações 4.8, 4.9, 4.10, 4.15, 4.16, 4.17 nas equações 4.20 e 4.21, ficaremos com:

$$\vec{H}_{1h} = \frac{\hat{I}_1}{2\pi} \left[ \frac{(y - y_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \frac{(y + y'_1)}{(x - x_1)^2 + (y + y'_1)^2} \right] \vec{a}_h \quad (4.22)$$

$$\vec{H}_{1v} = \frac{\hat{I}_1}{2\pi} \left[ \frac{(x - x_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \frac{(x - x_1)}{(x - x_1)^2 + (y + y'_1)^2} \right] \vec{a}_v \quad (4.23)$$

Por se tratar de uma corrente defasada, as componentes horizontal e vertical de campo também possuirão módulo e fase. Ou seja, ambas as componentes, horizontal e vertical, terão partes reais e imaginárias. Com isso é possível calcular o módulo da intensidade de campo magnético em cada direção.

$$H_{1h} = \sqrt{\text{Re}(\vec{H}_{1h})^2 + \text{Im}(\vec{H}_{1h})^2} \quad (4.24)$$

$$H_{1v} = \sqrt{\text{Re}(\vec{H}_{1v})^2 + \text{Im}(\vec{H}_{1v})^2} \quad (4.25)$$

E por fim, é calculado o módulo da intensidade de campo em um ponto  $p(x, y)$ , devido a uma corrente  $I_1$  que passa em um condutor que está posicionado em  $(x_1, y_1)$ , como sendo:

$$H_1 = \sqrt{(H_{1h})^2 + (H_{1v})^2} \quad (4.26)$$

### 4.3.3 Presença de N condutores

O campo magnético em um dado ponto  $p$ , devido à presença de  $N$  condutores e pelos quais estejam passando correntes, é dado por um somatório das contribuições de cada condutor para o campo nesse ponto  $p$ . Ou seja, as componentes horizontal total e vertical total,  $\vec{H}_H$  e  $\vec{H}_V$ , respectivamente, devido a todos os condutores, serão dadas pela soma das contribuições dos  $N$  condutores nas direções horizontal e vertical.

$$\vec{H}_H = \sum_{i=1}^N \vec{H}_{ih} \quad (4.27)$$

$$\vec{H}_V = \sum_{i=1}^N \vec{H}_{iv} \quad (4.28)$$

Por se tratar de correntes alternadas, possuidoras de módulo e fase, as componentes horizontal e vertical de campo também os terão. Sendo assim, da mesma forma que para um condutor único (equações 4.24 e 4.25) ambas as componentes, horizontal e vertical totais, também terão partes reais e imaginárias. O cálculo do módulo da intensidade de campo magnético em cada será conforme apresentado abaixo.

$$H_H = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \text{Re}(\vec{H}_{ih})\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \text{Im}(\vec{H}_{ih})\right)^2} \quad (4.29)$$

$$H_V = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \text{Re}(\vec{H}_{iv})\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \text{Im}(\vec{H}_{iv})\right)^2} \quad (4.30)$$

Alterando as expressões das intensidades de campo  $\vec{H}_{1h}$  e  $\vec{H}_{1v}$  (equações 4.22 e 4.22, respectivamente) de forma a levarem em consideração a presença de  $N$  condutores e substituindo-as nas expressões 4.29 e 4.29, tem-se:

$$\begin{aligned}
(H_H)^2 &= \left( \sum_{i=i}^N \frac{Re(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y'_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
&+ \left( \sum_{i=i}^N \frac{Im(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y'_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \quad (4.31)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(H_V)^2 &= \left( \sum_{i=i}^N \frac{Re(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
&+ \left( \sum_{i=i}^N \frac{Im(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \quad (4.32)
\end{aligned}$$

De posse dos módulos das intensidades de campo em ambas as direções, obtém-se o módulo da intensidade de campo magnético em um ponto  $(x, y)$ , considerando a presença do solo devido à presença de  $N$  condutores.

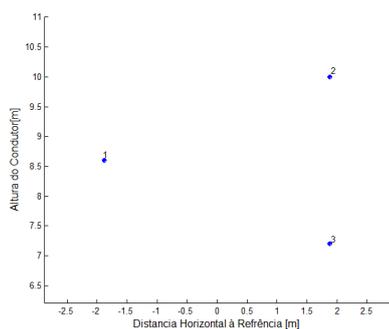
$$H = \sqrt{(H_H)^2 + (H_V)^2} \quad (4.33)$$

Por fim, substituindo as expressões de  $H_H^2$  e  $H_V^2$  (equações 4.31 e 4.32, respectivamente) na Equação 4.33, tem-se a expressão completa para a intensidade de campo magnético.

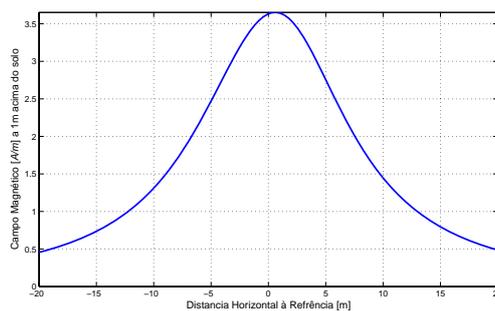
$$\begin{aligned}
H^2 &= \left( \sum_{i=i}^N \frac{Re(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y'_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
&+ \left( \sum_{i=i}^N \frac{Im(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y'_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
&+ \left( \sum_{i=i}^N \frac{Re(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
&+ \left( \sum_{i=i}^N \frac{Im(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \quad (4.34)
\end{aligned}$$

#### 4.3.4 Resultados

A seguir, nas figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, seguem resultados de cálculo de campo magnético para alguns padrões de estruturas utilizados em linhas de transmissão.

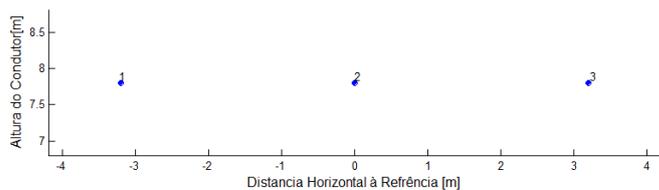


(a) Disposição dos Condutores na Estrutura

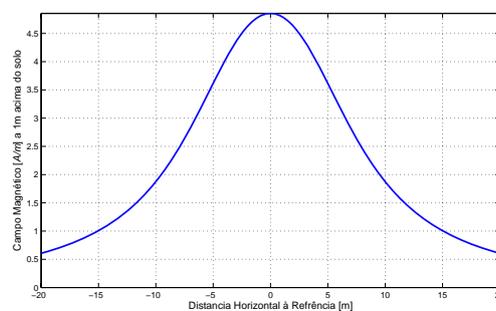


(b) Intensidade de Campo Magnético

Figura 4.7: LT 69kV tipo C carregada com uma corrente de 300A

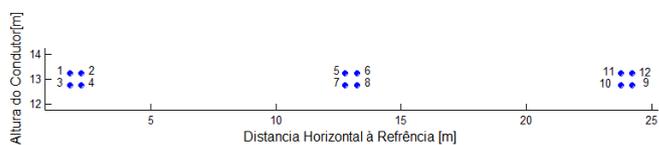


(a) Disposição dos Condutores na Estrutura

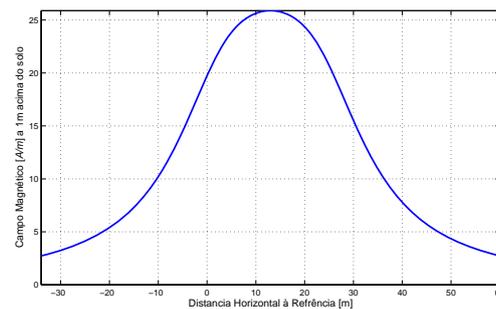


(b) Intensidade de Campo Magnético

Figura 4.8: LT 69kV tipo H carregada com uma corrente de 300A

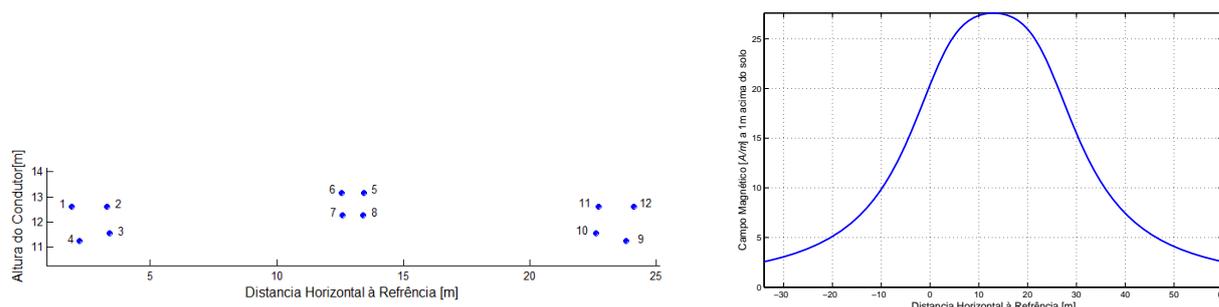


(a) Disposição dos Condutores na Estrutura



(b) Intensidade de Campo Magnético

Figura 4.9: LT 500kV com espaçamento entre condutores de uma mesma fase de 0.47cm, carregada com uma corrente de 2000A



(a) Disposição dos Condutores na Estrutura

(b) Intensidade de Campo Magnético

Figura 4.10: LT 500kV que utiliza técnica de LPNE, carregada com uma corrente de 2000A

## 4.4 Cálculo de campo elétrico pela Lei de Coulomb

O cálculo de campo elétrico ( $E$ ) em  $kV/m$ , baseado na Lei de Coulomb, segue raciocínio muito similar ao utilizado no cálculo do campo magnético pela Lei de Ampere [41].

Antes do cálculo de campo elétrico é necessário fazer algumas considerações e observações:

1. Não há cargas livres no ar.
2. A permissividade do ar ( $\varepsilon$ ) em  $F/m$ , é constante em toda parte.

$$\varepsilon = \frac{1}{wv^2} = \frac{10^{-9}}{36\pi} \cong 8.85 \times 10^{-12} \quad (4.35)$$

3. A terra é considerada um condutor perfeito. Isto é válido, devido à reatância dielétrica do ar que para campos quase estáticos (60Hz), em  $M\Omega m$ , é de:

$$\frac{1}{\varepsilon\omega} \cong 300 \quad (4.36)$$

Onde

$\omega$  é a frequência angular em  $rad/s$ .

4. A distribuição de carga em torno do condutor é tida como uniforme.
5. Cada condutor é substituído por uma linha de carga localizada no centro do mesmo.

6. Os condutores são tidos como superfícies equipotenciais.
7. Linhas que utilizem feixes de condutores terão seus feixes substituídos por um condutor único de raio equivalente dado por [3]:

$$R_{med} = \sqrt[n]{r_1 r_2 \dots r_n (S_1 S_1 \dots S_{n-1})^n} \quad (4.37)$$

Onde

$n$  é o número de condutores que compõem cada feixe.

$r_i$  é o raio de cada condutor.

$S_i$  é a distância entre os condutores de uma mesma fase.

8. O solo é assumido como um condutor plano perfeito com potencial zero. Essa consideração faz com que os condutores imagens estejam a uma profundidade igual à altura dos condutores reais, como pode ser visto na Figura 4.11 [42].

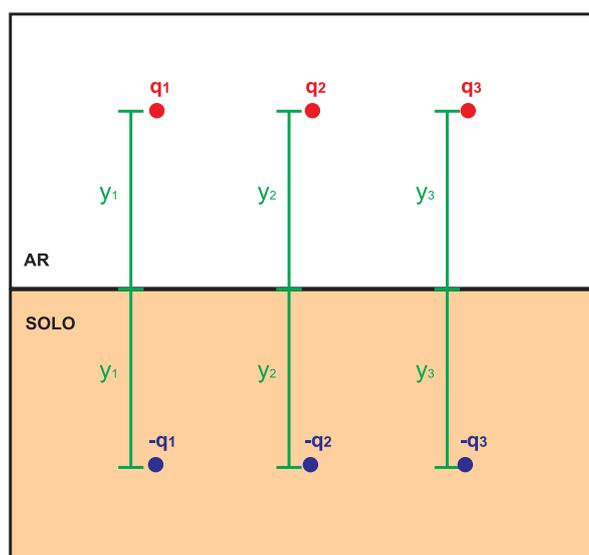


Figura 4.11: Representação dos condutores e suas respectivas imagens no cálculo de campo magnético.

#### 4.4.1 Campo Elétrico em um ponto $p(x, y)$ devido às carga $q_i$ de um condutor com tensão $V_i$ no ponto $(x_i, y_i)$

É importante lembrar que os condutores serão considerados infinitos e paralelos à terra. O campo elétrico em um ponto  $p$ , gerado pela carga de um condutor infinito, conforme Figura 4.12, é dado pela Equação 4.38 [41].

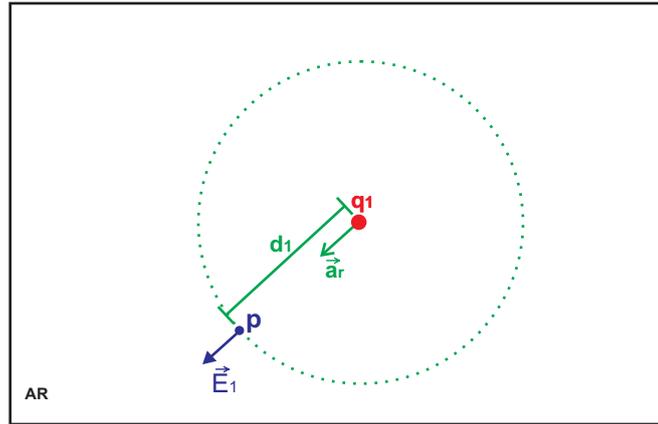


Figura 4.12: Representação do campo elétrico no ponto  $p$  distante  $d_1$  de um condutor sob tensão  $V_1$ .

$$\vec{E}_1 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon d_1} \vec{a}_r \quad (4.38)$$

Com o intuito de facilitar cálculos futuros, o vetor campo elétrico  $\vec{E}_1$  pode ser decomposto em componentes horizontal ( $\vec{E}_{1h}$ ) e vertical ( $\vec{E}_{1v}$ ), de forma similar como foi feito para o vetor campo magnético. A diferença é que a componente horizontal será obtida através do  $\cos(\alpha_1)$  e a componente vertical pelo  $\sen(\alpha_1)$ , como pode ser visto na Figura 4.13 e pelas equações 4.39 e 4.40

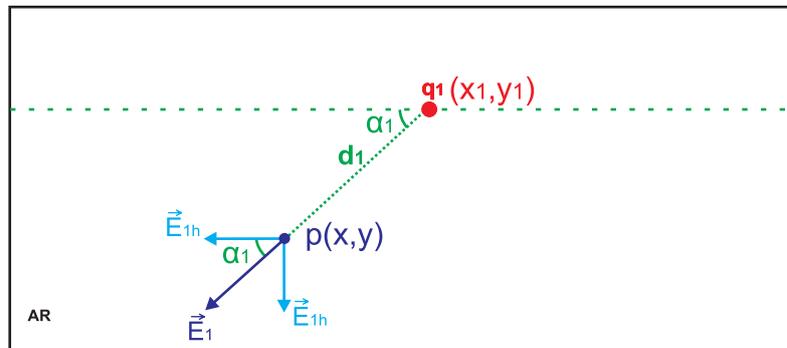


Figura 4.13: Representação do vetor campo elétrico  $\vec{E}_1$  e suas componentes horizontal e vertical,  $\vec{E}_{1h}$  e  $\vec{E}_{1v}$ .

$$\vec{E}_{1h} = E_1 \cos(\alpha_1) \vec{a}_h = \frac{q_1}{2\pi\epsilon d_1} \cos(\alpha_1) \vec{a}_h \quad (4.39)$$

$$\vec{E}_{1v} = E_1 \sen(\alpha_1) \vec{a}_v = \frac{q_1}{2\pi\epsilon d_1} \sen(\alpha_1) \vec{a}_v \quad (4.40)$$

Onde:

$$d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (4.41)$$

$$\text{sen}(\alpha_1) = \frac{(y - y_1)}{d_1} = \frac{(y - y_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}} \quad (4.42)$$

$$\text{cos}(\alpha_1) = \frac{(x - x_1)}{d_1} = \frac{(x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}} \quad (4.43)$$

Substituindo os valores de  $d_1$ ,  $\text{sen}(\alpha_1)$  e  $\text{cos}(\alpha_1)$  nas equações 4.39 e 4.39 tem-se:

$$\vec{E}_{1h} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon d_1} \text{cos}(\alpha_1) \vec{a}_h = \frac{q_1}{2\pi\epsilon} \frac{(x - x_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \vec{a}_h \quad (4.44)$$

$$\vec{E}_{1v} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon d_1} \text{sen}(\alpha_1) \vec{a}_v = \frac{q_1}{2\pi\epsilon} \frac{(y - y_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \vec{a}_v \quad (4.45)$$

#### 4.4.2 Presença do Solo

Para o cálculo de campos elétricos considera-se que o plano dos condutores imagem está na superfície do solo [42][3]. Dessa forma o condutor imagem estará a uma profundidade igual a sua altura, conforma Figura 4.14.

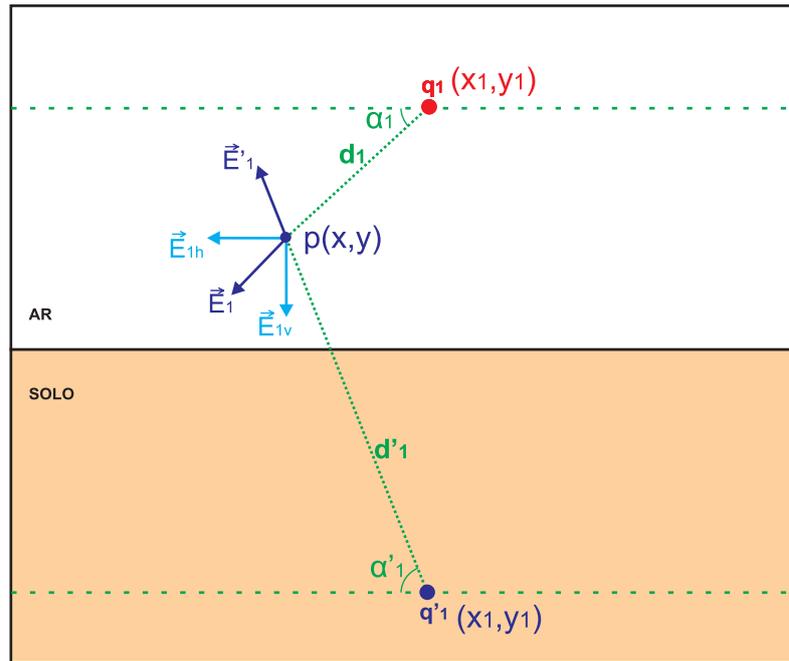


Figura 4.14: Representação do vetor campo elétrico  $\vec{E}_1$  e suas componentes considerando a presença do solo

A distância  $d'_1$  do condutor imagem ao ponto  $p(x, y)$ , o  $\text{sen}(\alpha'_1)$  e o  $\text{cos}(\alpha'_1)$ , serão calculados de forma similar como para o campo magnético, diferenciando agora apenas pela igualdade entre as distâncias do solo ao condutor e do solo à imagem do condutor.

$$d'_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y + y_1)^2} \quad (4.46)$$

$$\text{sen}(\alpha'_1) = \frac{(y + y_1)}{d'_1} = \frac{(y + y_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y + y_1)^2}} \quad (4.47)$$

$$\text{cos}(\alpha'_1) = \frac{(x - x_1)}{d'_1} = \frac{(x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y + y_1)^2}} \quad (4.48)$$

Como se quer calcular o campo elétrico para tensões alternadas, possuidoras de defasagem angular, de forma similar às correntes no cálculo de campos magnéticos, considera-se a carga do condutor composta de parte real e imaginária, ou melhor, como um fasor  $\hat{q}$ . Sendo assim, as componentes do campo elétrico na direção horizontal e vertical são vetores compostos pela soma de dois fasores, um devido à carga do condutor real e outro da carga do condutor imagem.

$$\vec{E}_{1h} = \hat{E}_1 \text{cos}(\alpha_1) \vec{a}_h + \hat{E}'_1 \text{cos}(\alpha'_1) \vec{a}_h \quad (4.49)$$

$$\vec{E}_{1v} = \hat{E}_1 \text{sen}(\alpha_1) \vec{a}_v + \hat{E}'_1 \text{sen}(\alpha'_1) \vec{a}_v \quad (4.50)$$

A carga do condutor imagem tem valor oposto ao da carga do condutor real [42]. Dessa forma as equações 4.49 e 4.50 podem ser simplificadas colocando-se em evidência a carga  $\hat{q}$ .

$$\vec{E}_{1h} = \frac{\hat{q}_1}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{\cos(\alpha_1)}{d_1} - \frac{\cos(\alpha'_1)}{d'_1} \right] \vec{a}_h \quad (4.51)$$

$$\vec{E}_{1v} = \frac{\hat{q}_1}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{\text{sen}(\alpha_1)}{d_1} - \frac{\text{sen}(\alpha'_1)}{d'_1} \right] \vec{a}_v \quad (4.52)$$

Substituindo agora as equações 4.8, 4.9, 4.10, 4.46, 4.47, 4.48 nas equações 4.51 e 4.52 tem-se:

$$\vec{E}_{1h} = \frac{\hat{q}_1}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(x - x_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \frac{(x - x_1)}{(x - x_1)^2 + (y + y_1)^2} \right] \vec{a}_h \quad (4.53)$$

$$\vec{E}_{1v} = \frac{\hat{q}_1}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(y - y_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \frac{(y + y_1)}{(x - x_1)^2 + (y + y_1)^2} \right] \vec{a}_v \quad (4.54)$$

Por se tratar de cargas fasoriais, as componentes horizontal e vertical de campo também possuirão módulo e fase. Ou seja, ambas as componentes, horizontal e vertical, terão partes reais e imaginárias. Com isso é possível calcular o módulo do campo elétrico em cada direção através das expressões abaixo.

$$E_{1h} = \sqrt{\text{Re}(\vec{E}_{1h})^2 + \text{Im}(\vec{E}_{1h})^2} \quad (4.55)$$

$$E_{1v} = \sqrt{\text{Re}(\vec{E}_{1v})^2 + \text{Im}(\vec{E}_{1v})^2} \quad (4.56)$$

Por fim o módulo de campo elétrico em um ponto  $p(x, y)$  devido uma carga  $q_1$  que passa em um condutor posicionado em  $(x_1, y_1)$  é dada pela seguinte expressão:

$$E_1 = \sqrt{(E_{1h})^2 + (E_{1v})^2} \quad (4.57)$$

### 4.4.3 Presença de $N$ fases distintas

O cálculo de campo elétrico para  $N$  fases distintas é realizado da forma similar ao cálculo do campo magnético para  $N$  condutores. A diferença básica é que para o campo magnético consideram-se as correntes de cada condutor, enquanto para o cálculo de campo elétrico é utilizado um condutor equivalente quando há mais de um condutor por fase, como explicitado anteriormente. Sendo assim, o campo elétrico em um dado ponto  $p$ , devido à presença de  $N$  fases distintas e considerando a presença do solo, é dado por um somatório simples das contribuições de cada fase nesse ponto. Ou seja, as componentes horizontal total ( $\hat{E}_H$ ) e vertical total  $\hat{E}_V$  devido a contribuição de todas as fases, serão dadas pela soma das contribuições das  $N$  fases nas direções horizontal e vertical.

$$\vec{E}_H = \sum_{i=1}^N \hat{E}_{ih} \quad (4.58)$$

$$\vec{E}_V = \sum_{i=1}^N \hat{E}_{iv} \quad (4.59)$$

Lembrando que se trata de cargas fasoriais, possuidoras de módulo e fase, as componentes horizontal e vertical de campo também o terão. Sendo assim, da mesma forma que para uma única fase, ambas as componentes, horizontal e vertical totais, também terão partes reais e imaginárias resultando nas seguintes equações:

$$E_H = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \text{Re}(\hat{E}_{ih})\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \text{Im}(\hat{E}_{ih})\right)^2} \quad (4.60)$$

$$E_V = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \text{Re}(\hat{E}_{iv})\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \text{Im}(\hat{E}_{iv})\right)^2} \quad (4.61)$$

Alterando às expressões de  $\vec{E}_{1h}$  e  $\vec{E}_{1v}$ , de forma a levarem em consideração a presença de  $N$  fases distintas e substituindo-as nas expressões 4.60 e 4.60, tem-se:

$$\begin{aligned} (E_H)^2 = & \left( \sum_{i=i}^N \frac{\text{Re}(\hat{q}_i)}{2\pi\varepsilon} \left[ \frac{(x-x_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \frac{(x-x_i)}{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2} \right] \right)^2 \\ & + \left( \sum_{i=i}^N \frac{\text{Im}(\hat{q}_i)}{2\pi\varepsilon} \left[ \frac{(x-x_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \frac{(x-x_i)}{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2} \right] \right)^2 \end{aligned} \quad (4.62)$$

$$(E_V)^2 = \left( \sum_{i=1}^N \frac{Re(\hat{q}_i)}{2\pi\varepsilon} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Im(\hat{q}_i)}{2\pi\varepsilon} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 \quad (4.63)$$

De posse dos módulos do campo elétrico em ambas as direções, o módulo da intensidade de campo elétrico em um ponto  $(x, y)$  considerando a presença do solo e devido à presença de  $N$  fases distintas é dado por:

$$E = \sqrt{(E_H)^2 + (E_V)^2} \quad (4.64)$$

Por fim, substituindo as as equações de  $E_H^2$  e  $E_V^2$  obtém-se a expressão completa para o campo elétrico.

$$E^2 = \left( \sum_{i=1}^N \frac{Re(\hat{q}_i)}{2\pi\varepsilon} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Im(\hat{q}_i)}{2\pi\varepsilon} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Re(\hat{q}_i)}{2\pi\varepsilon} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Im(\hat{q}_i)}{2\pi\varepsilon} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 \quad (4.65)$$

#### 4.4.4 Cálculo da carga

A carga dos condutores ou do condutor de raio equivalente, no caso de linhas com mais de um condutor por fase, é obtida através da Matriz de Coeficientes de Maxwell  $[P]_{N \times N}$  [3] [42] [4], que é dada pela Equação 4.66.

$$[P]_{N \times N} [Q]_{N \times 1} = [V]_{N \times 1} \quad (4.66)$$

Onde

$N$  é a quantidade de fases distintas do sistema.

$[V]$  é o vetor tensão fase-terra (fasor tensão)

$[Q]$  é a vetor de cargas das fases.

A matriz  $[P]$  terá elementos da seguinte forma:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad (4.67)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right) \quad (4.68)$$

Onde:

$D_{ij}$  é a distância do condutor (ou condutor equivalente de fase)  $i$  até a imagem do condutor  $j$ , onde  $i \neq j$ .

$d_{ij}$  é a distância do condutor (ou condutor equivalente de fase)  $i$  até o condutor  $j$ .

$r_i$  é o raio do condutor (ou condutor equivalente) da fase  $i$ .

$h_i$  é a altura condutor (ou condutor equivalente) da fase  $i$ .

#### 4.4.5 Resultados

A seguir, nas figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18, seguem resultados de cálculo de campo elétrico para alguns padrões de estruturas utilizados em linhas de transmissão.

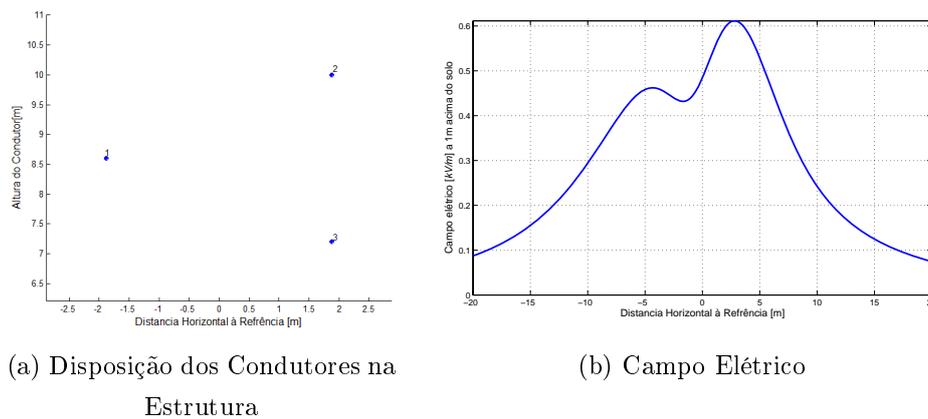
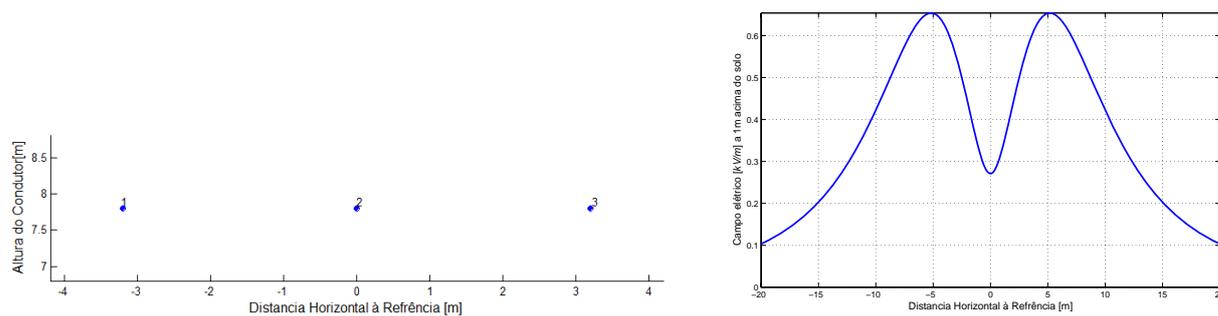


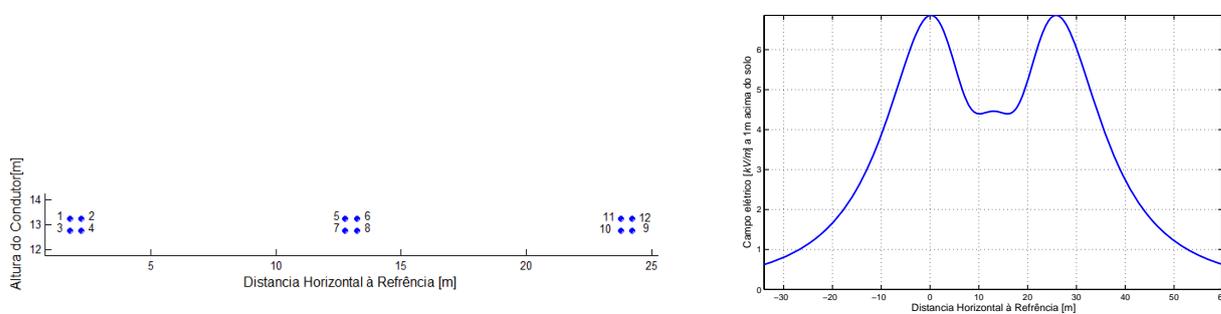
Figura 4.15: LT 69kV tipo C.



(a) Disposição dos Condutores na Estrutura

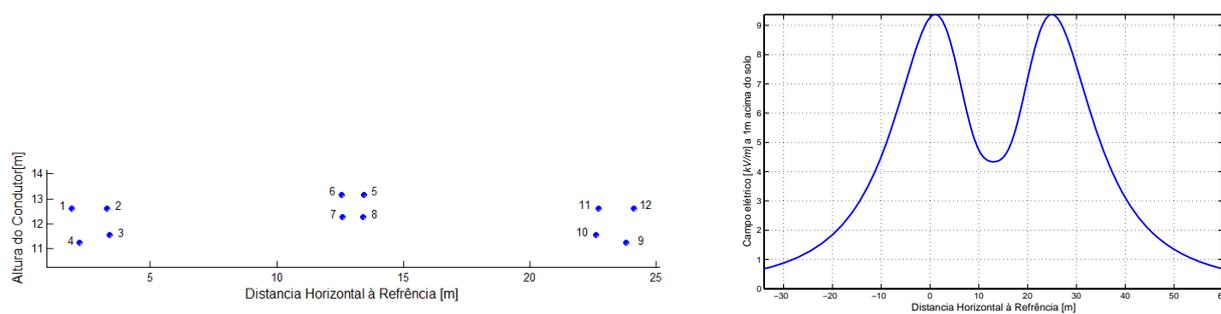
(b) Campo Elétrico

Figura 4.16: LT 69kV tipo H.



(a) Disposição dos Condutores na Estrutura

(b) Campo Elétrico

Figura 4.17: LT 500kV com espaçamento entre condutores de uma mesma fase de  $0.47\text{cm}$ .

(a) Disposição dos Condutores na Estrutura

(b) Campo Elétrico

Figura 4.18: LT 500kV que utiliza técnica de LPNE.

## 4.5 Otimização de Campos

De posse das expressões para o cálculo de campo elétrico e magnético descritas anteriormente, pode-se minimizar os campos oriundos de uma linha de transmissão com o rearranjo de seus condutores, utilizando técnicas de otimização. Especificamente

nesse trabalho utilizou-se o *software* LOQO. Detalhes a respeito do LOQO juntamente com um exemplo simplificado, passo a passo, estão no Apêndice A.

Em um problema de otimização, dois parâmetros principais devem ser observados: a função objetivo a ser otimizada e as restrições relativas a função.

#### 4.5.1 Funções Objetivo

A função objetivo de um problema de otimização é a função que se deseja otimizar. O LOQO permite a otimização, apenas, de uma função objetivo por vez. Sendo assim, para minimização de campos elétricos e magnéticos foram adotadas como funções objetivo suas respectivas equações 4.65 e 4.34. Em ambas funções tem-se como variáveis as posições  $(x_i, y_i)$  de cada condutor da linha. Abaixo são mostradas as funções objetivos adotadas para o campo elétrico (4.69) e magnético (4.70).

$$\begin{aligned}
 f(x_i, y_i) = E^2 = & \left( \sum_{i=1}^N \frac{Re(\hat{q}_i)}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 \\
 & + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Im(\hat{q}_i)}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 \\
 & + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Re(\hat{q}_i)}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 \quad (4.69) \\
 & + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Im(\hat{q}_i)}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2
 \end{aligned}$$

O cálculo de campo magnético é realizado em um determinado instante no tempo. Ocorre que a variação da corrente nos condutores se dá de forma lenta. Dessa forma, não há necessidade de considerar as correntes dos condutores como sendo uma variável.

$$\begin{aligned}
f(x_i, y_i) = H^2 = & \left( \sum_{i=1}^N \frac{Re(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y'_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
& + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Im(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y'_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
& + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Re(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
& + \left( \sum_{i=1}^N \frac{Im(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \quad (4.70)
\end{aligned}$$

Sabe-se que há uma forte dependência das cargas dos condutores em relação à disposição dos condutores, conforme apresentado na Equação 4.66. Porém, devido às restrições adotadas, os valores dessas cargas pouco alterarão. Isso porque, nas novas disposições encontradas, os condutores ocuparão praticamente o mesmo espaço geométrico ocupado anteriormente.

#### 4.5.2 Restrições

As restrições têm um papel tão importante quanto a função objetivo a ser minimizada. Restrições diferentes podem acarretar em resultados finais diferentes, mesmo com a mesma função objetivo. Por isso, seus critérios de definição devem ser condizentes com o objetivo final do problema.

O objetivo é encontrar uma distribuição ótima de condutores, de forma a minimizar os campos de uma linha já existente. Sendo assim, a nova configuração deve utilizar as mesmas estruturas da linha existente. A nova distribuição será implementada, por exemplo, utilizando espaçadores e/ou outra configuração de cadeia de isoladores diferentes.

Uma restrição simples para conseguir a minimização de campo em um ponto, é utilizar as posições dos condutores que se encontram nos pontos extremos de cada fase da linha original como fronteiras limites para as novas posições dos condutores. Dessa forma as distâncias entre fases encontradas na linha original não são ultrapassadas, assegurando a suportabilidade fase-fase original. Um exemplo dessa restrição pode ser visto na Figura 4.19, onde as fronteiras de cada fase são representadas pelos quadriláteros vermelhos.

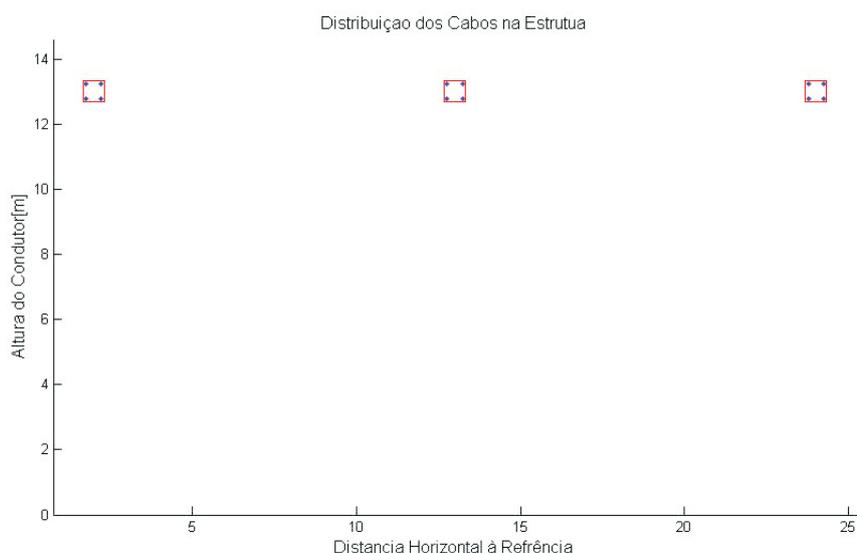


Figura 4.19: Representação das fronteiras limites dentro das quais os condutores podem estar na nova configuração. Linha de 500kV com 47cm de espaçamento entre condutores de uma mesma fase.

Outra restrição interessante consiste na utilização da posição extrema do condutor de forma a fazer uma fronteira limite maior englobando todas as fases. Associada a essa restrição tem-se a distância mínima entre fases ( $D_{min}$ ) que é a menor distância, entre fases, encontrada na linha original. Tanto a  $D_{min}$ , em verde, quanto a fronteira, em vermelho, podem ser vistas a Figura 4.20.

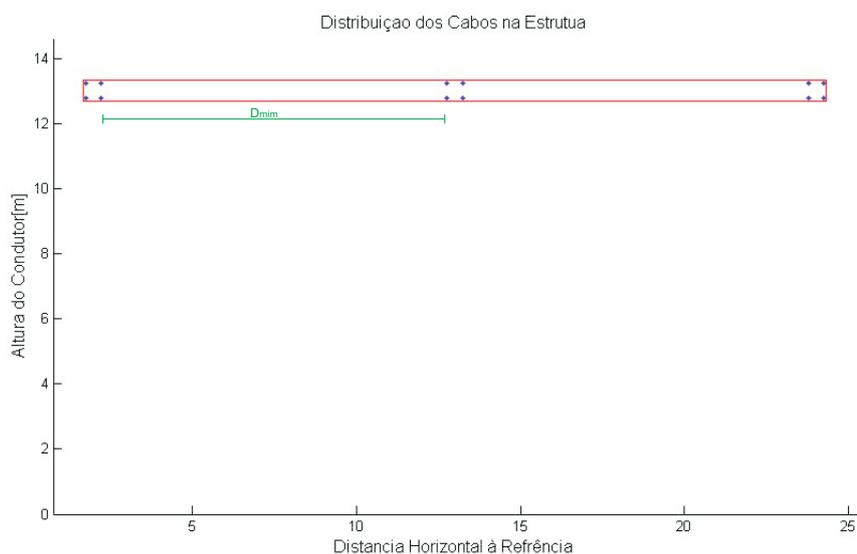


Figura 4.20: Representação das fronteiras limites dentro das quais os condutores podem estar na nova configuração juntamente com a distância mínima entre fases adotada para este exemplo. Linha de 500kV com 47cm de espaçamento entre condutores de uma mesma fase.

Associada às duas restrições acima se pode acrescentar a distância mínima entre condutores de uma mesma fase denominada  $d_{min}$ . Essa restrição foi necessária de forma

a evitar a sobreposição de condutores de uma mesma fase, situação que na prática é impossível.

Outras restrições foram associadas a estas de forma a obter resultados diferentes. Estas restrições serão descritas nos capítulos posteriores.

## 4.6 Conclusão

Pelo que foi apresentado, o cálculo de campo elétrico e magnético oriundo de linhas de transmissão, baseados nas Leis de Coulomb e Ampere, respectivamente, pode ser realizado de posse das expressões encontradas neste capítulo.

Nesse capítulo viu-se uma sinalização de que o rearranjo otimizado dos condutores de uma linha, visando a minimização dos campos é possível, utilizando as expressões matemáticas encontradas e com o auxílio de ferramentas de otimização matemática. As considerações e restrições sugeridas têm por objetivo encontrar resultados que tenham custo-efetividade baixo, de forma que possam ser adotados pelas empresas transmissoras de energia elétrica com um custo mínimo e mesmo assim atender os limites de campos estabelecidos pelas normas. O capítulo seguinte são apresentados os resultados da minimização dos campos através do rearranjo dos condutores da linha, juntamente com as restrições e critérios adotados.

# 5

## MINIMIZAÇÃO DE CAMPOS EM LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500kV

### 5.1 Introdução

Baseando-se nos tópicos abordados nos capítulos anteriores, tais como limites de exposição e cálculos de campos elétrico e magnético, esse capítulo explicita a minimização dos campos eletromagnéticos gerados por uma linha padrão de transmissão de 500kV utilizada pela Chesf - Companhia Hidrelétrica do São Francisco - através do rearranjo otimizado dos condutores desta linha.

### 5.2 Minimização de Campos

Observando as equações utilizadas para o cálculo de campos elétrico e magnético, mostrados no capítulo anterior, vê-se que as mesmas caracterizam-se por gerarem valores diferentes para diferentes pontos do espaço. Isso ocorre, pois essas equações são funções do ponto  $p(x, y)$  onde se deseja calcular o campo. Ou seja, para cada ponto do espaço onde se quer obter o valor dos campos tem-se uma função distinta. É importante ressaltar que em otimização é necessário definir uma função objetivo, dessa forma, para minimizar os campos deve-se definir o ponto que será utilizado. Ou seja, devemos escolher o ponto onde se dá o maior valor de campo a ser minimizado.

Apesar de cada tipo de estrutura utilizada na transmissão de energia possuir perfis de campos elétrico e magnético bem distintos, esses perfis se caracterizam por serem bem definidos. Mesmo que haja uma modificação da disposição dos condutores, as

coordenadas onde ocorre os valores máximos de campo tendem a estar em pontos já conhecidos.

Apenas se houver uma mudança radical na disposição dos condutores de uma estrutura é que há uma grande mudança nos pontos onde ocorrem os máximos do campo. Porém, na maioria das vezes, uma mudança desse tipo descaracteriza a estrutura em questão. Como o objetivo deste trabalho é a minimização dos campos sem que, ao mesmo tempo, ocorra à descaracterização da estrutura, serão utilizados os perfis de campo encontrados na linha original para definir os pontos onde ocorrem os máximos dos campos. Por exemplo, uma linha que tem a disposição horizontal dos condutores, conforme apresentado na Figura 5.1 tende a ter os valores máximos de campo elétrico abaixo das fases laterais e os de campo magnético abaixo da fase central, como pode ser visto na Figura 5.2. Já a estrutura de circuito duplo de  $230kV$  com disposição vertical dos condutores, como mostrado na Figura 5.3, tem o valor máximo de campo no centro de seu eixo, conforme pode ser visto na Figura 5.4.

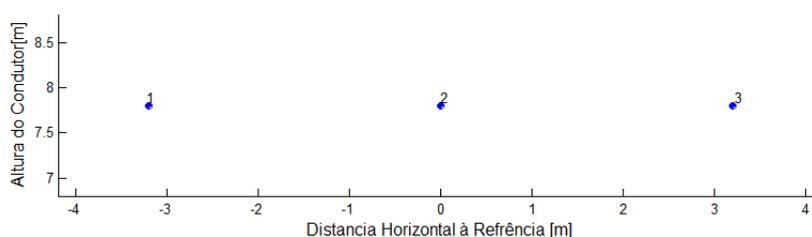
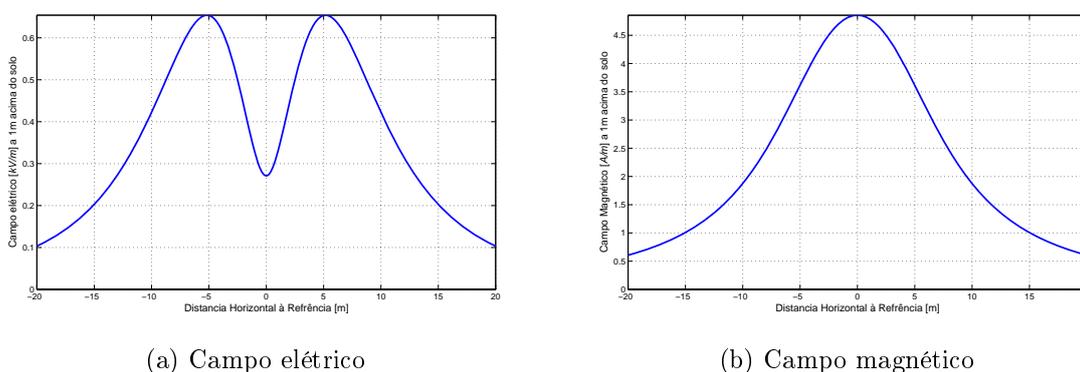


Figura 5.1: Disposição dos condutores de uma LT  $69kV$  tipo H.



(a) Campo elétrico

(b) Campo magnético

Figura 5.2: LT  $69kV$  tipo H carregada com uma corrente de  $300A$ .

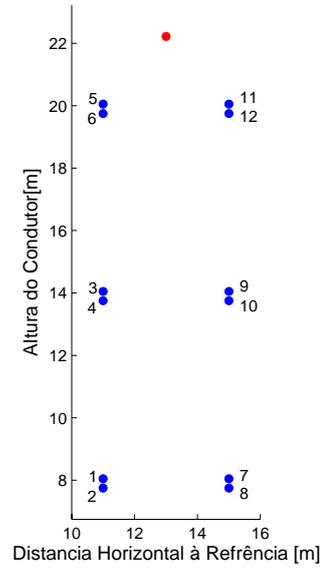


Figura 5.3: Disposição dos condutores de uma LT 230kV circuito duplo.

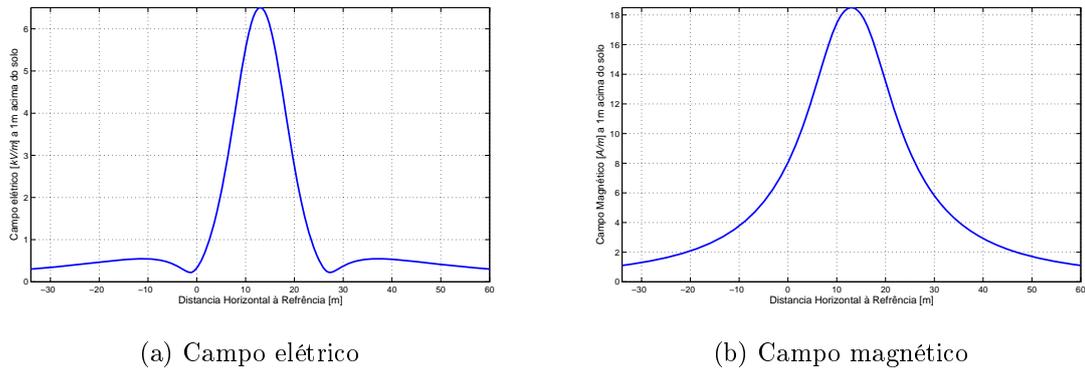


Figura 5.4: LT 230kV circuito duplo faseamento abcabc carregada com uma corrente de 800A.

Dessa forma, em cada estrutura e para cada um dos campos que se deseja minimizar, são definidos os pontos onde os campos devem ser otimizados. Como as equações de campo elétrico e magnético, mostradas no capítulo anterior, calculam os campos em um único ponto  $p_j = (x_j, y_j)$  do espaço, utilizou-se dois artifícios de forma a obter uma única função ( $F(p_1, \dots, p_n)$ ), que levasse em consideração a análise de mais de um ponto  $p$  ao mesmo tempo. O primeiro artifício, descrito pela Equação 5.1, é o somatório das funções nos pontos desejados.

$$F(p_1, \dots, p_n) = \sum_{j=1}^n f(x_j, y_j) \quad (5.1)$$

E o segundo, descrito pela Equação 5.2, como sendo o máximo da função entre esses

pontos.

$$F(p_1, \dots, p_n) = \max(f(x_1, y_1), \dots, f(x_j, y_j), \dots, f(x_n, y_n)) \quad (5.2)$$

Cada um dos dois critérios quando utilizado define dois problemas bem distintos. Quando se aplica o critério do valor máximo da função obtém-se uma disposição dos condutores que produz o menor valor de campo para o ponto que possui o valor máximo de campo entre os pontos. Apesar de parecer mais atrativo, esse critério pode fazer com que haja uma mudança da função objetivo no decorrer do processo de minimização. Em cada iteração a posição dos condutores muda e em uma dessas mudanças pode ocorrer a modificação do perfil de campo fazendo com que o ponto onde ocorre o valor máximo de campo mude. De qualquer maneira se mostrou um critério interessante, principalmente nos casos em que as restrições não permitiam uma alteração significativa da disposição dos condutores.

Já quando se utiliza o somatório dos pontos, tende-se a encontrar uma disposição dos condutores que produz um perfil de campo horizontalmente linear. Incrementa-se ainda mais esse critério quando são utilizados pesos multiplicadores diferentes para cada ponto, como mostrado na Equação 5.3. Dessa forma, é possível caracterizar o "grau de importância" de cada um dos pontos.

$$F(p_1, \dots, p_n) = \sum_{j=1}^n P_{eso_j} \cdot f(x_j, y_j) \quad (5.3)$$

Ou seja, para os pontos onde há uma maior probabilidade de ocorrência dos valores máximos de campo atribui-se um peso maior que aos outros.

O artifício do somatório das funções nos pontos desejados se mostrou mais eficiente que o do máximo e foi utilizado nos resultados que são mostrados neste trabalho. Isso ocorreu, devido a comparação de várias funções, feitas pelo segundo artifício, e pela filosofia de análise realizada pelo LOQO. Trata-se de um programa iterativo, que em cada iteração avalia a função objetivo, tomando como base o ponto encontrado na iteração anterior. Ao tentar minimizar o máximo da função entre dois pontos, por exemplo, seguindo o segundo artifício, está se fazendo na verdade uma comparação entre duas funções distintas, sendo ambas dependentes da disposição dos condutores. No decorrer das iterações essa disposição, e com isso o perfil do campo, tende a se modificar. A modificação do perfil de campo pode fazer com que a localização do

ponto de máximo valor de campo também se modifique. Dessa forma, a mudança constante da disposição dos condutores, pode fazer com uma função  $f(x_1, y_1)$ , por exemplo, seja maior que as demais em uma iteração e na próxima isso não se repita. Ou seja, a cada iteração pode haver modificação da função analisada, fazendo com que o *software* atinja seu limite de iterações, sem que alcance a minimização desejada.

A adoção desses critérios se mostra necessária, principalmente, quando se quer minimizar campos elétricos de linhas que possuem um padrão de disposição horizontal de condutores, como é o caso da linha de  $500kV$  da Chesf.

### 5.2.1 Definição dos pontos de minimização

A Figura 5.5 mostra a disposição dos condutores de uma linha de  $500kV$  padrão, utilizada pela Chesf, onde em azul estão representados os condutores das fases e em vermelho os cabos-guarda. Sobrepondo esta figura aos gráficos mostrados nas figuras 5.6(a) e 5.6(b), referente aos campos elétrico e magnético, respectivamente, é possível observar os locais onde correm os picos dos campos como sendo:

1. Abaixo de uma das fases laterais;

24m para a linha de  $500kV$  padrão Chesf.

2. No eixo, centro, da linha de transmissão;

13m para a linha de  $500kV$  padrão Chesf.

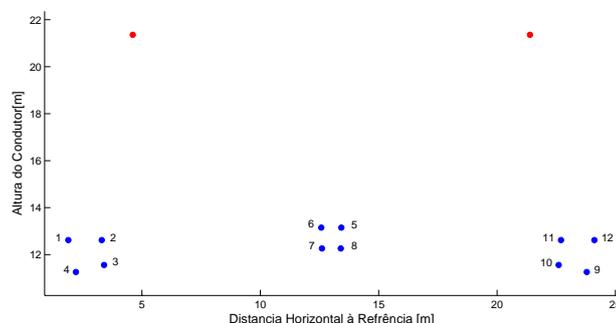


Figura 5.5: Disposição dos condutores de uma LT  $500kV$  padrão Chesf.

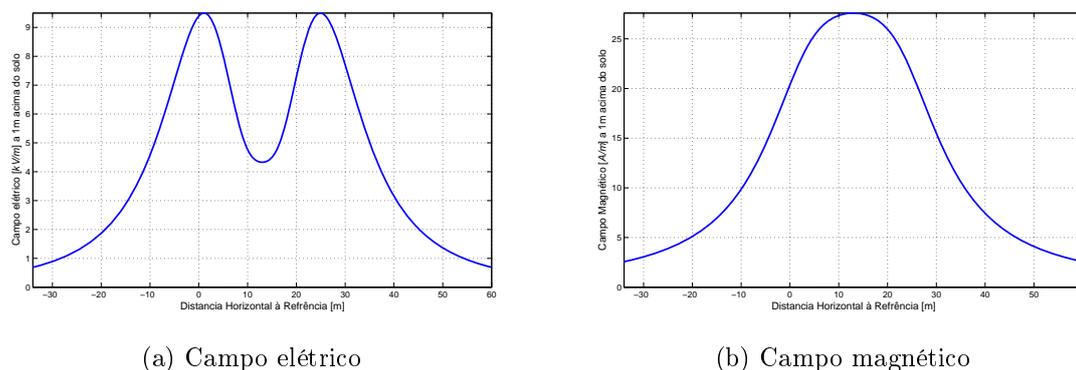


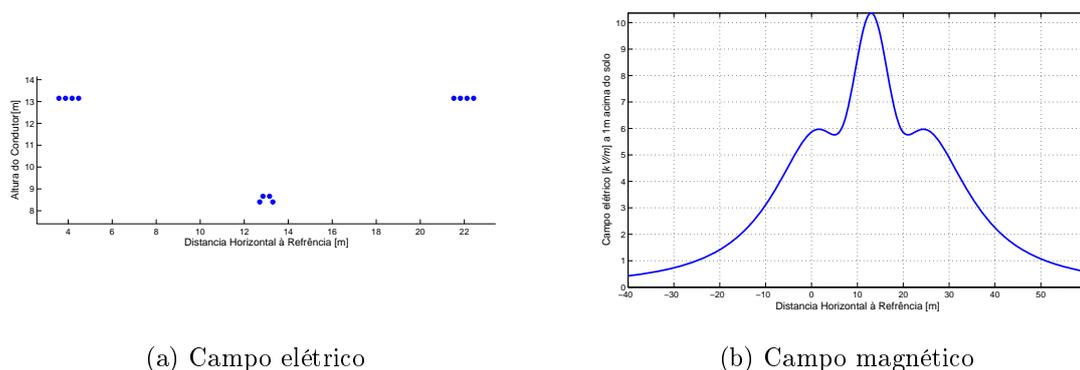
Figura 5.6: Campos elétrico (a) e magnético (b) para disposição dos condutores mostrada na Figura 5.5. Linha carregada com uma corrente de 2000A.

Associa-se aos locais definidos acima, a altura onde se deseja minimizar os campos. Nesse caso 1m de altura, pois é o valor adotado pelas normas quando estas definem os limites de campo [43]. Por fim, tem-se os pontos e respectivos pesos para a linha em questão como sendo os mostrados na tabela abaixo:

Tabela 5.1: Pontos e pesos utilizados para minimização dos campos elétrico e magnético da linha de 500kV, padrão Chesf.

Ponto	$(x, y)$ [m]	Peso Campo Elétrico	Peso Campo Magnético
1	(24 , 1)	2	-
2	(13 , 1)	1	1

É importante entender que para a minimização de campos elétricos há a necessidade de utilizar os dois pontos definidos acima. Quando se utiliza apenas um dos pontos, ocorre uma mudança brusca do perfil do campo, fazendo com que o valor máximo não ocorra mais no ponto determinado. A Figura 5.7, apresentada abaixo, exemplifica a minimização de campo elétrico para a linha da Figura 5.5, desconsiderando a presença dos cabos-guarda, utilizando apenas o ponto  $(x = 24m, y = 1)$ , abaixo da fase lateral.



(a) Campo elétrico

(b) Campo magnético

Figura 5.7: Resultado de minimização de campo elétrico na LT 500kV, utilizando ponto 24m e 0.30 entre condutores de uma mesma fase.

Comparando os gráficos de campo elétrico antes (Figura 5.6(a)) e depois (Figura 5.7(b)) observa-se que houve uma mudança no perfil do campo. Antes existam dois pontos de máximo que se situavam logo abaixo das fases laterais, mas com a minimização o perfil passou a ter apenas um ponto de máximo abaixo da fase central. Isso ocorreu, pois a minimização de campo aconteceu apenas no ponto de  $(x = 24m, y = 1)$  que se localiza abaixo de uma das fases laterais, não levando em consideração o ponto  $(x = 13m, y = 1)$  que se situa abaixo da fase central.

### 5.2.2 Cabos-guarda

Outro ponto importante a ser observado é que na minimização de campos, dispensou-se a presença dos cabos-guarda (*CG*). Isso porque esse trabalho presa por utilizar à mesma estrutura da linha original. Dessa forma, definiu-se uma área que os condutores das fases podem ocupar de forma a não diminuir a eficiência dos cabos guarda. Como mostrado na Figura 5.8, a área que será ocupada pelos condutores das fases, em vermelho, continuará dentro da área de proteção dos cabos-guarda, em verde. Ou seja, os cabos das fases continuarão sendo protegidos pelos cabos guarda, sem que haja perda de confiabilidade da linha.

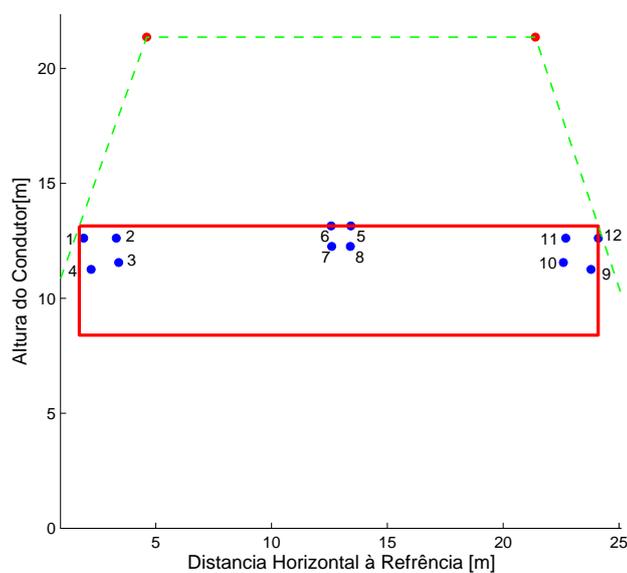


Figura 5.8: Representação da área de proteção dos cabos-guarda (abaixo da linha verde pontilhada), junto com área que pode ser ocupada pelos condutores (em vermelho).

Quanto à influência nos valores dos campos, sabe-se que não haverá alteração nos valores de campo magnético de uma linha com ou sem CG, pois foi considerado que, para fins de cálculo de campo, não há correntes passando por esses cabos. Já a influência nos valores de campo elétrico, pode-se dizer que não são significativas. Para perceber isso, basta comparar os perfis de campo encontrados em linhas com cabos-guarda, mostrados nas figuras 5.4 e 5.6, e sem cabos-guarda, mostrados nas figuras 5.10 e 5.12. Dessa comparação pode-se montar a tabela a seguir:

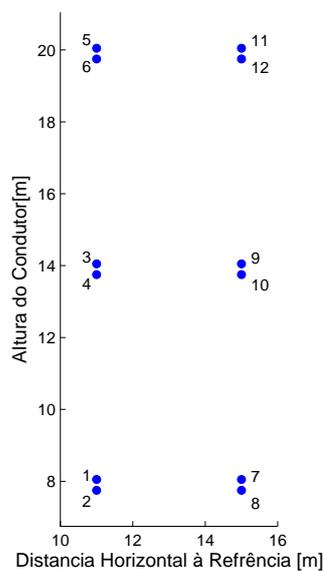


Figura 5.9: Disposição dos condutores de uma LT 230kV circuito duplo.

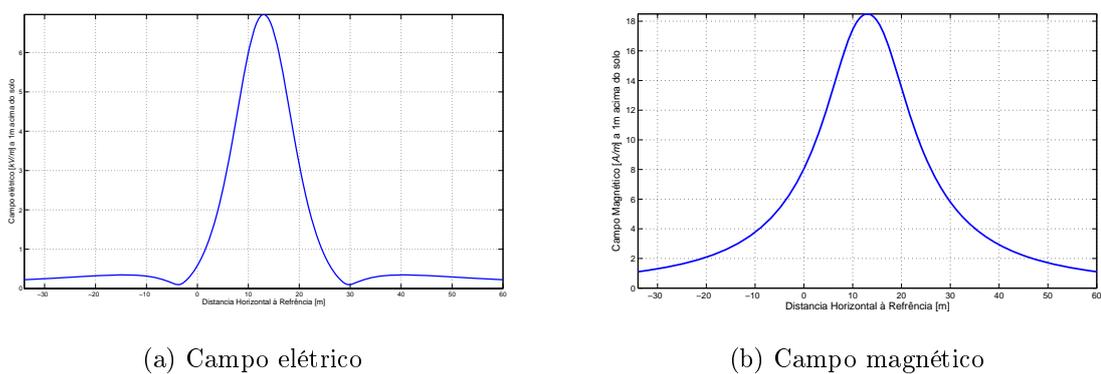


Figura 5.10: LT 230kV circuito duplo faseamento abcabc carregada com uma corrente de 800A sem cabo-guarda.

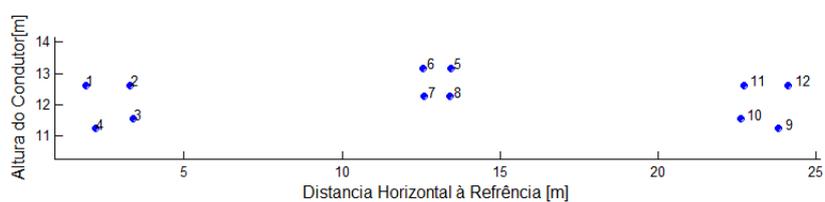


Figura 5.11: Disposição dos condutores de uma LT 500kV padrão Chesf.

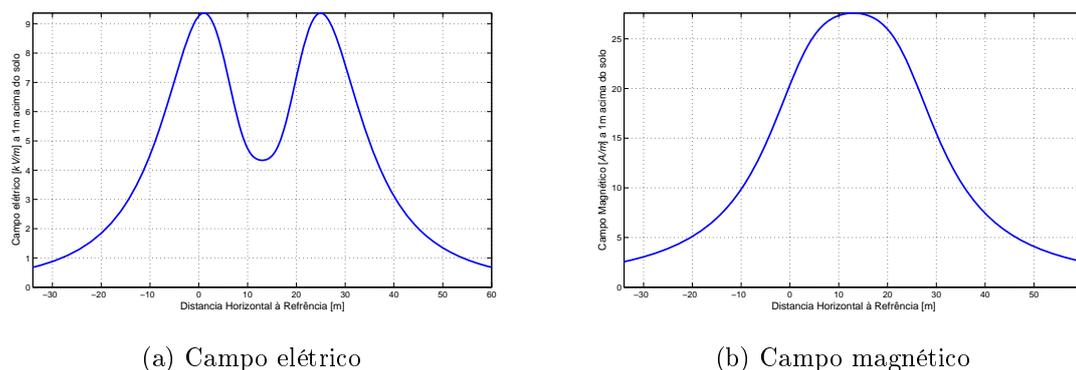


Figura 5.12: LT 500kV carregada com uma corrente de 2000A.

Tabela 5.2: Comparação entre estruturas com e sem cabos-guarda dos valores máximos de campos elétrico e magnético

Tipo de Linha	Campo elétrico [kV/m]		Campo magnético [A/m]	
	Com CG	Sem CG	Com CG	Sem CG
LT 230kV Circuito Duplo	6,5024	6,9659	18,4894	18,4894
LT 500kV LPNE	9,4974	9,3698	27,5967	27,5967

Pode-se notar uma pequena variação nos valores de pico do campo elétrico de 0,46kV para a LT de 230kV e de 0,13kV para a LT 500kV LPNE. Essas variações são esperadas, pois os cabos-guarda estão sendo considerados multiterrestados. Ou seja, a presença de um cabo-guarda introduz um referencial de potencial zero acima dos condutores da linha. Porém, como já havia sido adiantada, essa variação não é significativa.

### 5.3 Restrições

Como explanado no Capítulo 4, as restrições utilizadas são o ponto chave do problema, direcionando-o para o tipo de solução a ser encontrada. De forma geral, cada restrição determina uma solução distinta. Sendo assim, para que os resultados obtidos satisfaçam os objetivos, definem-se as seguintes restrições:

- Posições máximas e mínimas horizontais dos condutores ( $X_{max}$  e  $X_{min}$ );
- Posições máximas e mínimas verticais dos condutores ( $Y_{max}$  e  $Y_{min}$ );

- Distância mínima entre condutores de fases distintas ( $D_{min}$ ), conforme expressão abaixo:

$$\begin{aligned}
 (y_i^a - y_i^b)^2 + (x_i^a - x_i^b)^2 &\geq D_{min}^2 \\
 (y_i^a - y_i^c)^2 + (x_i^a - x_i^c)^2 &\geq D_{min}^2 \\
 (y_i^b - y_i^c)^2 + (x_i^b - x_i^c)^2 &\geq D_{min}^2
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Onde  $x_i$  e  $y_i$  são as posições dos condutores nas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

- Distância mínima entre condutores de mesma fase ( $d_{min}$ ) - restringe indiretamente a potência natural da LT - conforme equação abaixo:

$$\begin{aligned}
 (y_i^a - y_j^a)^2 + (x_i^a - x_j^a)^2 &\geq d_{min}^2 \\
 (y_i^b - y_j^b)^2 + (x_i^b - x_j^b)^2 &\geq d_{min}^2 \\
 (y_i^c - y_j^c)^2 + (x_i^c - x_j^c)^2 &\geq d_{min}^2
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Com  $i \neq j$ .

- Simetria da disposição dos condutores, conforme Equação 5.6 ;

$$x_i^a = 2 \times eixo - x_i^c; \tag{5.6}$$

No caso da linha de  $500kV$ , mostrada na Figura 5.11, seu eixo está localizado na posição  $x = 13m$ .

Ainda para a linha de transmissão de  $500kV$ , padrão Chesf, vista na Figura 5.11, tem-se os limites para as restrições, apresentados nas tabelas 5.3 e 5.4:

Tabela 5.3: Restrições utilizadas, em metros, para linha de  $500kV$ , padrão Chesf. Eixo da linha em  $x = 13m$ .

$X_{max}$	$X_{min}$	$Y_{max}$	$Y_{min}$	$D_{min}$
24,1	1,89	13,15	8,4	9,5

Como pode ser visto observando a Figura 5.13, os limites superiores e laterais da área que os novos condutores podem ocupar passam pelos posições 1, 2, 6, 5, 11 e 12 dos

condutores, os quais se situam nas partes mais extremas da linha. Já o limite inferior foi adotado o que preconiza a NBR-5422, que define para passagem de pedestres de uma linha de  $500kV$  a altura de  $8,4m$ .

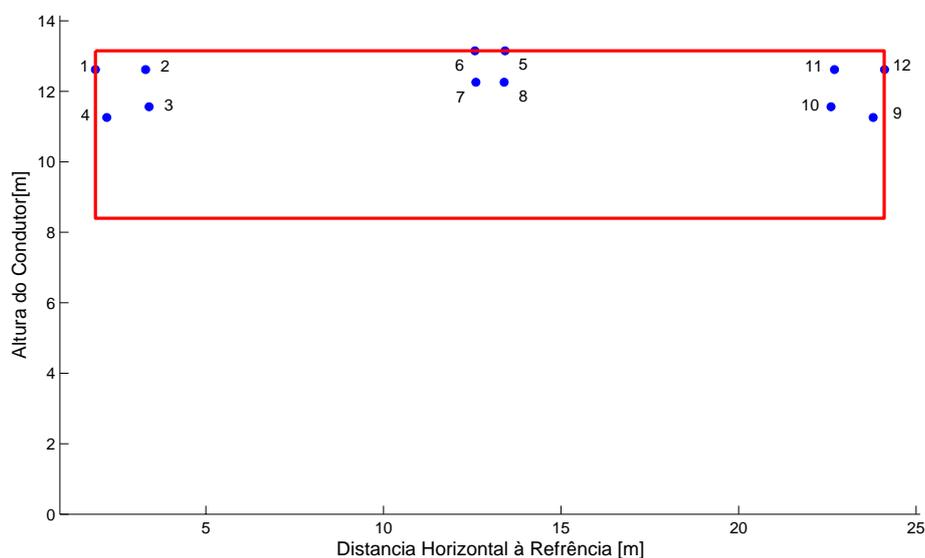


Figura 5.13: Representação da area que pode ser ocupada pelos condutores, em vermelho.

Tabela 5.4: Distância entre condutores de uma mesma fase, em metros, para linha de  $500kV$ .

$d_{min}$	0,30	0,47	0,80	1,00
-----------	------	------	------	------

As distâncias entre fases de  $0,30$  e  $0,47m$  foram baseadas em outros dois padrões que a Chesf possui, enquanto as de  $0,80m$  e  $1,00$  são sugeridas como opções de forma a diminuir o impacto no valor da potência natural da linha.

Para a linha em questão, a Tabela 5.5 mostra os valores de campos elétrico e magnético máximos e a potência natural da mesma.

Tabela 5.5: Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.11.

$E_{max}$ [kV/m]	$H_{max}$ [A/m]	$P_{natural}$ [MW]
9,3698	27,5967	1206,40

Outra restrição importante é a potência natural( $P_N$ ) da linha, definida pela Equação [1]. Trata-se da potência que linha pode transmitir, sendo mínimas as perdas de trans-

missão.

$$P_N = \frac{V^2}{Z_N} \quad (5.7)$$

Onde

$V$  é a tensão de operação fase-fase da LT.

$Z_N$  é a impedância natural da linha.

$$Z_N = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.8)$$

Onde

$L$  é a indutância equivalente da LT.

$C$  é a capacitância equivalente da linha.

Como para uma LT a tensão de operação da linha é constante, para os fins de cálculo de campos, a  $P_N$  é função direta da  $L$  e da  $C$  equivalentes da linha. Porém, a indutância e capacitância da linha de transmissão dependem diretamente da disposição dos condutores na estrutura. A matriz indutância é obtida através das seguintes equações [1]:

$$\begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} \\ L_{13} & L_{23} & L_{33} \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

Onde

$$L_{ii} = K_1 \ln \left( \frac{2h_i}{r_i} \right) \quad (5.10)$$

$$L_{ij} = K_1 \ln \left( \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (5.11)$$

Sendo

$K_1$  é uma constante dependente da unidade utilizada.

$D_{ij}$  é a distância do condutor (ou condutor equivalente de fase)  $i$  até a imagem do condutor  $j$ , onde  $i \neq j$ .

$d_{ij}$  é a distância do condutor (ou condutor equivalente de fase)  $i$  até o condutor  $j$ .

$r_i$  é o raio do condutor (ou condutor equivalente) da fase  $i$ .

$h_i$  é a altura condutor (ou condutor equivalente) da fase  $i$ .

A capacitância de uma linha é obtida pela inversão da matriz  $[P]$  detalhada no capítulo anterior.

$$[P]_{N \times N} [Q]_{N \times 1} = [V]_{N \times 1} \quad (5.12)$$

$$[C] = [P]_{N \times N}^{-1} \quad (5.13)$$

Onde

$C$  é a matriz capacitância.

Ao invés de colocar diretamente a expressão da  $P_N$  da linha como restrição, optou-se por restringir as distâncias entre os condutores de forma que indiretamente potência natural fosse limitada. Como a distância entre condutores de fases diferentes ( $D_{min}$ ) foi adotada a mesma da linha original, a restrição da  $P_N$  tornou-se função apenas da distância mínima entre condutores de uma mesma fase ( $d_{min}$ ). Isso proporcionou um maior controle das disposições dos condutores encontrados, sendo possível conseguir configurações mais variadas quando, por exemplo, adotou-se distâncias de fase diferentes para cada fase. A utilização dessa restrição ainda proporcionou uma menor dificuldade de implementação, pois não foi preciso utilizar as equações 5.9 e 5.13, calcular a indutância e capacitância características da LT para depois aplicar na Equação 5.7.

#### 5.4 Minimização de Campos - $d_{min}$ igual para todas as fases

Para minimização de campo magnético foi utilizada a equação demonstrada no capítulo 5 como a função objetivo, conforme mostrada abaixo:

$$\begin{aligned}
f(x_i, y_i) = & \left( \sum_{i=i}^N \frac{Re(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y'_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
& + \left( \sum_{i=i}^N \frac{Im(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y'_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
& + \left( \sum_{i=i}^N \frac{Re(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2 \\
& + \left( \sum_{i=i}^N \frac{Im(\hat{I}_i)}{2\pi} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y'_i)^2} \right] \right)^2
\end{aligned} \tag{5.14}$$

Para minimização de campo elétrico também foi utilizada a equação demonstrada no capítulo 5 como a função objetivo.

$$\begin{aligned}
f(x_i, y_i) = & \left( \sum_{i=i}^N \frac{Re(\hat{q}_i)}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 \\
& + \left( \sum_{i=i}^N \frac{Im(\hat{q}_i)}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 \\
& + \left( \sum_{i=i}^N \frac{Re(\hat{q}_i)}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2 \\
& + \left( \sum_{i=i}^N \frac{Im(\hat{q}_i)}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{(y + y_i)}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \right)^2
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Após minimização de campo magnéticos foram obtidas as novas disposições dos condutores como mostrado na Figura 5.14 e os respectivos perfis de campo, conforme Figura 5.15.

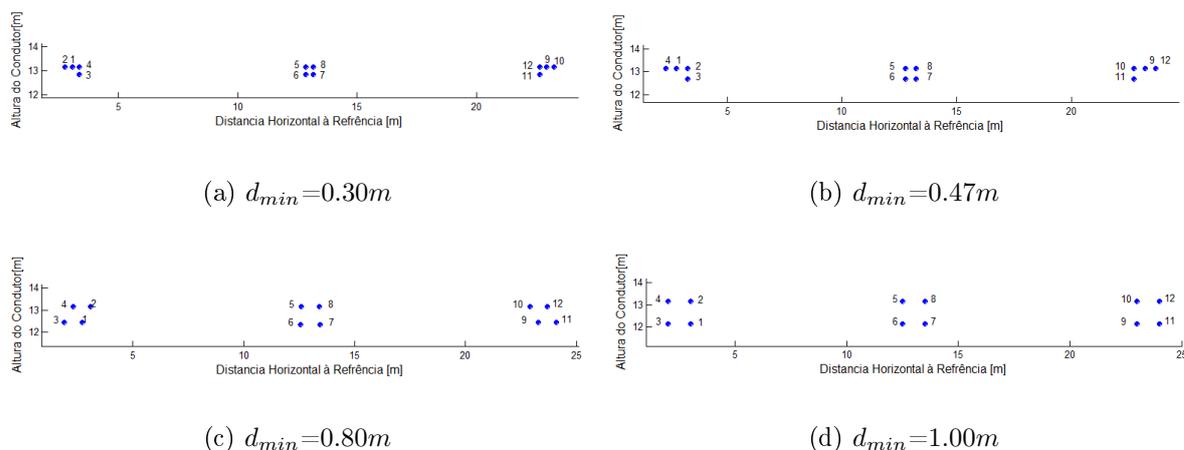


Figura 5.14: Disposição dos condutores após minimização de campo magnético para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas.

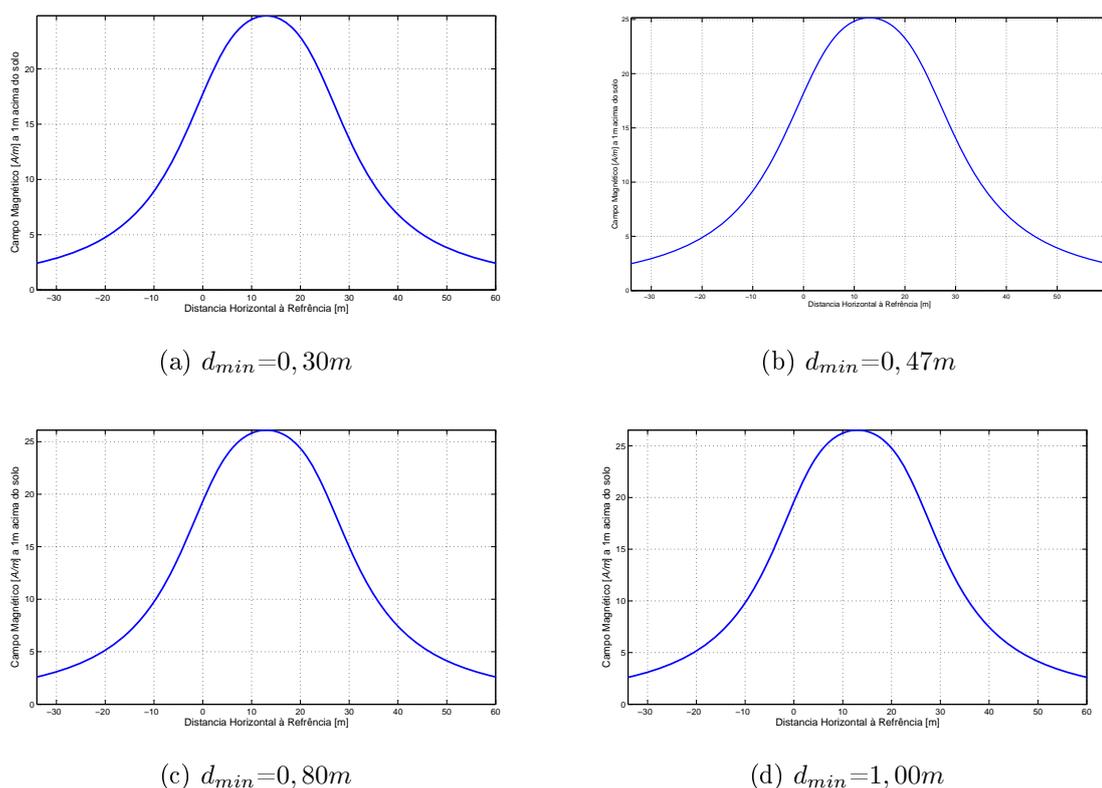


Figura 5.15: Perfil de campo magnético após minimização para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas.

Para cada  $d_{min}$  foram encontrados resultados distintos. Os valores de campo elétrico e magnético máximos, além de sua potência natural para cada disposição de condutores encontrada apresentadas na Figura 5.14 são mostradas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.14.

$d_{min}$ [m]	$E_{max}$ [kV/m]	$H_{max}$ [A/m]	$P_{natural}$ [MW]
0,30	6,2616	24,8030	966,39
0,47	6,8720	25,1587	1043,60
0,80	7,5852	26,1076	1118,10
1,00	8,1300	26,5200	1173,30

Na minimização dos campos elétricos foram obtidas as disposições dos condutores conforme Figura 5.16 bem como os respectivos perfis de campo elétrico apresentados na Figura 5.17.

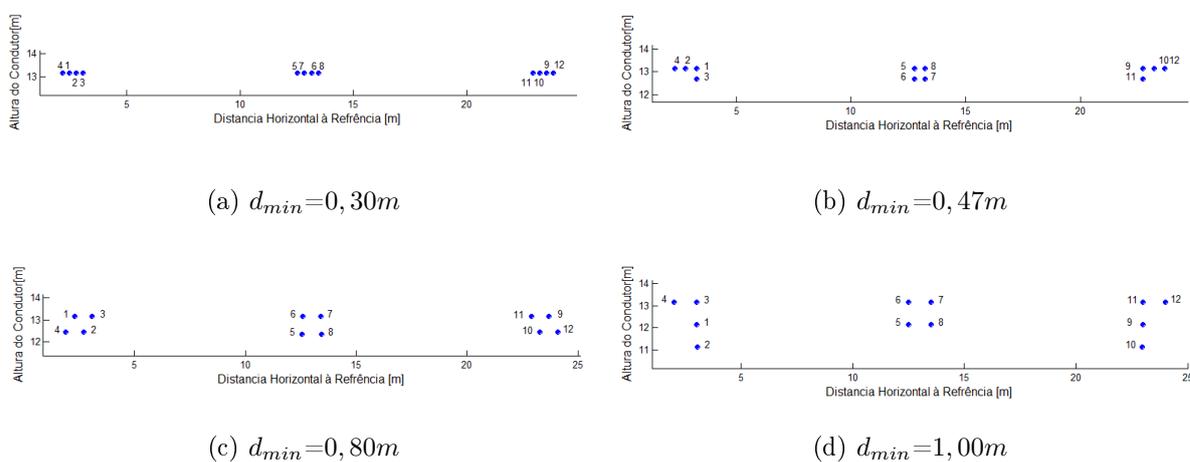


Figura 5.16: Disposição dos condutores após minimização de campo elétrico para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas.

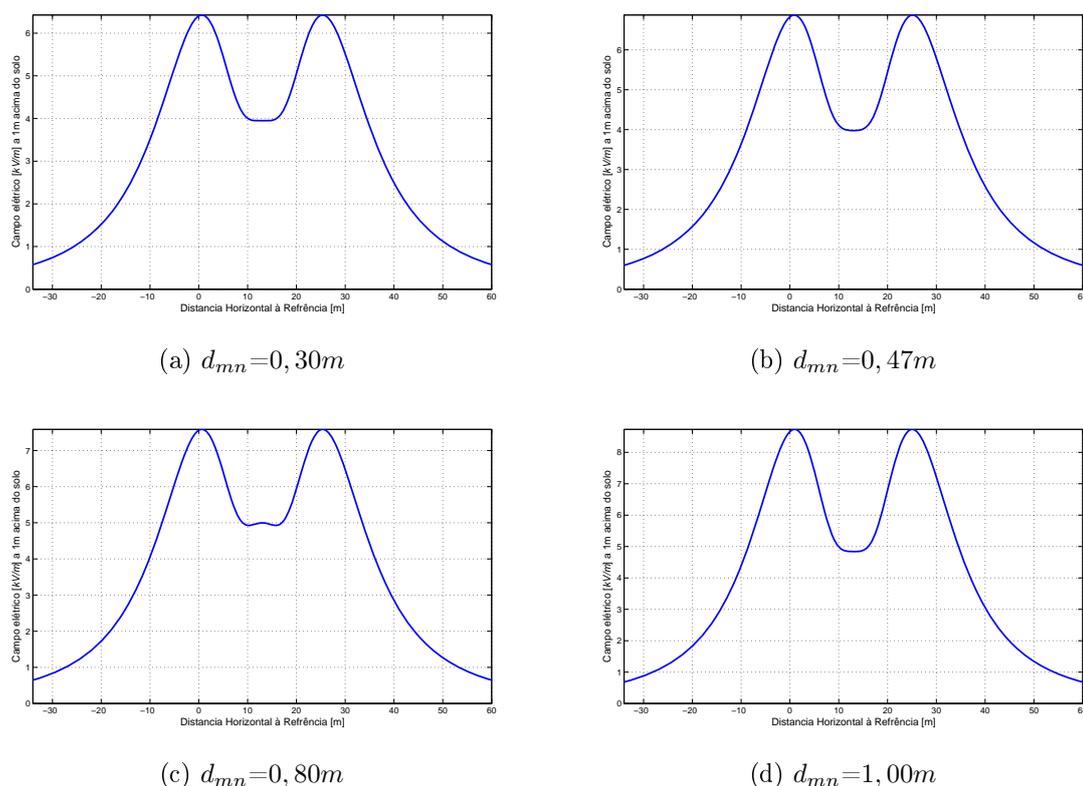


Figura 5.17: Perfil de campo elétrico após minimização para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas.

Para os resultados obtidos com a minimização dos campos elétricos monta-se a Tabela 5.7 que contém os valores máximos de campo elétrico e magnético, além das potências naturais para cada disposição de condutores mostrada na Figura 5.16.

Tabela 5.7: Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.16.

$d_{min}$ [m]	$E_{max}$ [kV/m]	$H_{max}$ [A/m]	$P_{natural}$ [MW]
0,30	6,4246	24,9752	985,44
0,47	6,8720	25,1587	1043,60
0,80	7,5852	25,1076	1118,10
1,00	8,7300	26,8900	1213,70

Analisando os valores mostrados nas tabelas 5.6 e 5.7, tem-se que quanto menor  $d_{min}$  menores serão os valores máximos de campos, tanto elétrico quanto magnético. Observa-se que quanto maior a proximidade dos condutores maior a tendência de minimização dos campos. Tanto a aproximação de condutores de uma mesma fase quanto a aproximação das fases da linha provocam a diminuição dos campos. Como apresen-

tado no Capítulo 4, tanto as cargas como as correntes dos condutores são consideradas equilibradas, defasadas de  $120^\circ$  uma da outra. Sendo assim, a aproximação dos condutores de fases diferentes provocam a diminuição do campo, pois faz com que os campos criados pelas cargas e pelas correntes tendam a se anularem. Como a distância entre condutores de fases diferente foi adotada como fixa, apenas a alteração da  $d_{min}$  provoca alteração nos valores de campo. Acontece que a aproximação dos condutores de uma mesma fase também provoca a diminuição da potência natural da LT, como pode ser visto nas tabelas 5.6 e 5.7. Por isso, há necessidade de limitar a distância entre os condutores de uma mesma fase ( $d_{min}$ ).

Observa-se também, que o campo elétrico sofre maior influência da variação de  $d_{min}$ , se comparado ao campo magnético. Isso se deve a maior dependência do campo elétrico com as distância entre condutores. Enquanto no campo magnético a posição dos condutores não influencia nos valores das correntes que estão passando por eles, grandeza utilizada no cálculo, no cálculo do campo elétrico a disposição dos condutores altera os valores das cargas utilizadas no cálculo desse campo. Isso pode ser visto, observand a Equação 5.12 dos coeficientes de Maxwell, utilizada na obtenção das cargas dos condutores. Nela, vê-se a dependência direta entre as cargas dos condutores e as posições dos mesmos.

Como a minimização de campo magnético não mostrou ser tão promissora quanto a de campo elétrico, os esforços foram focados na minimização de campo elétrico não deixando de observar sempre a evolução do campo magnético, de forma que não tenha seu valor aumentado demasiadamente.

## 5.5 Minimização de Campos - $d_{min}$ diferente para cada fase

Prestando um pouco mais atenção a disposição dos condutores na linha original, apresentada na Figura 5.11, vemos que as distância entre condutores são diferente para cada fase. Enquanto as fases laterais possuem um espaçamento de até  $1,84m$ , a fase central tem um espaçamento máximo de apenas  $1,21m$ .

### 5.5.1 Restrição por $d_{min}$ pré-definidas, diferentes para cada fase

Como visto anteriormente o campo elétrico é o que sofre maior influência da disposição dos condutores. Associado ao fato da linha original adotar distâncias mínimas

entre condutores de uma mesma fase diferentes para cada fase, foram obtidas soluções que mantivessem a característica assimétrica da linha e minimizassem o campo elétrico. Na Figura 5.18 são mostradas as disposições dos condutores e na Figura 5.19 os perfis de campo elétrico encontrados.

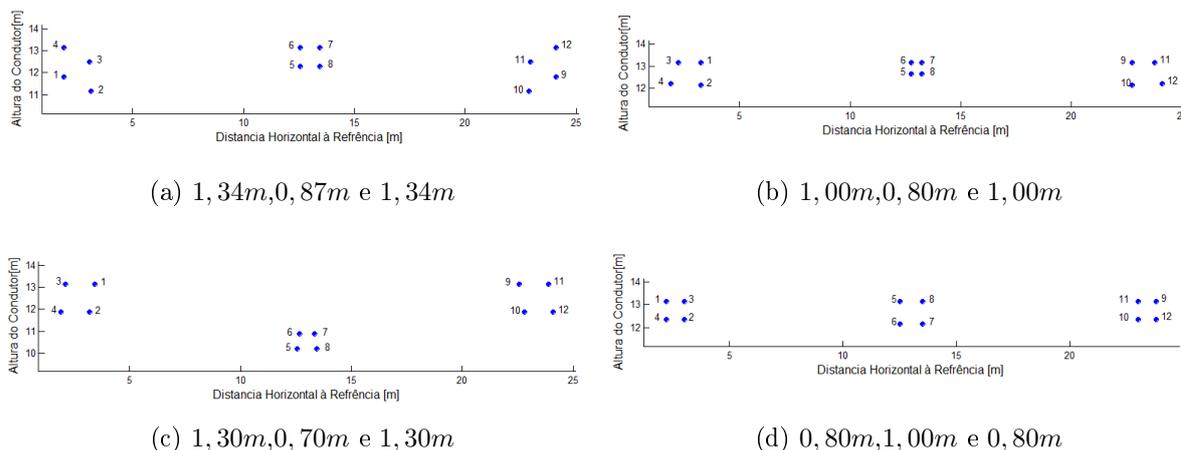


Figura 5.18: Disposição dos condutores após minimização de campo elétrico para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas-  $d_{min}^a, d_{min}^b$  e  $d_{min}^c$  respectivamente.

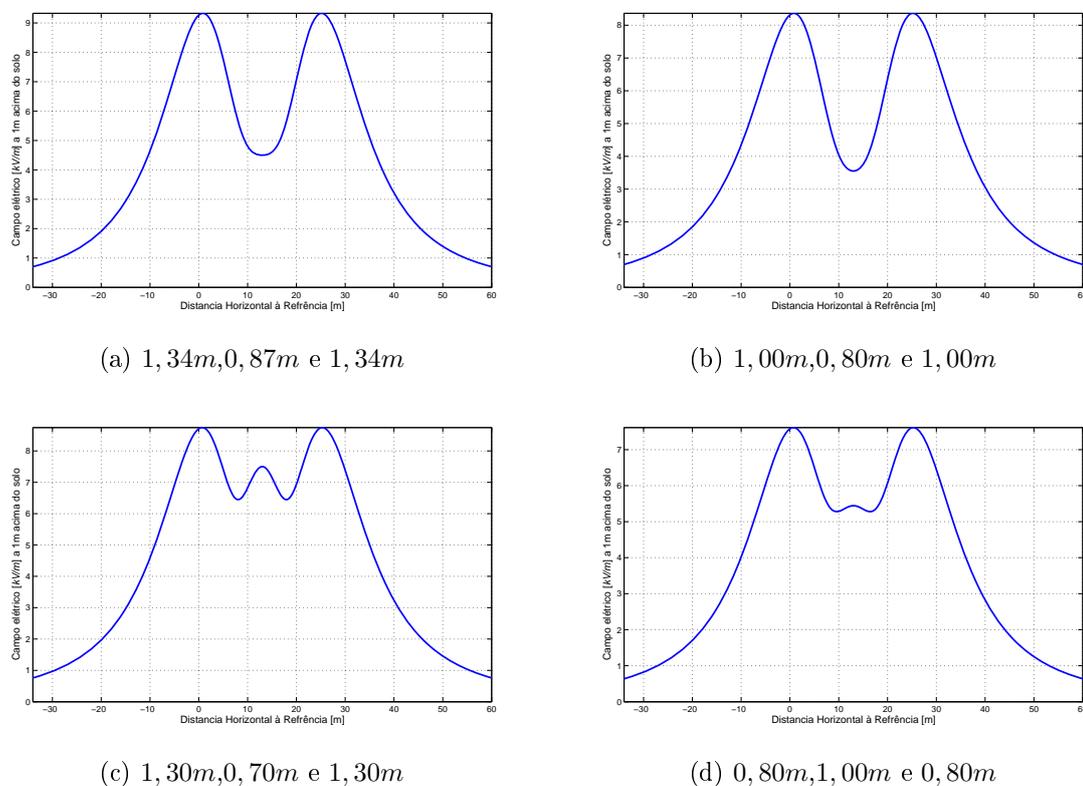


Figura 5.19: Perfil de campo elétrico após minimização para as respectivas distâncias entre condutores de mesma fase adotadas-  $d_{min}^a, d_{min}^b$  e  $d_{min}^c$  respectivamente.

Os valores de campo elétrico e magnético máximos, além da potência natural para cada disposição de condutores da Figura 5.18 são mostrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.18

$d_{min}^a$ [m]	$d_{min}^b$ [m]	$d_{min}^c$ [m]	$E_{max}$ [kV/m]	$H_{max}$ [A/m]	$P_{natural}$ [MW]
1,34	0,87	1,34	9,3293	27,4972	1209,20
1,00	0,80	1,00	8,3656	26,0808	1133,50
1,30	0,70	1,30	8,7459	29,8459	1192,30
0,80	1,00	0,80	7,6131	26,2501	1141,30

Vê-se que das disposições dos condutores obtidas, a última, apresentada na Figura 5.18(d), é que melhor alia diminuição do campo elétrico a grande potência natural. Essa configuração diferencia-se das demais por ser a única que possui uma  $d_{min}^a < d_{min}^b$ .

### 5.5.2 Restrição pela soma da $d_{min}^a$ , $d_{min}^b$ e $d_{min}^c$

Anteriormente cada  $d_{min}$  das fases foi pré-definida, mas é possível fazer com que seus valores sejam ajustados automaticamente. Para isso foi introduzido mais um critério baseado na observação da Figura 5.20.

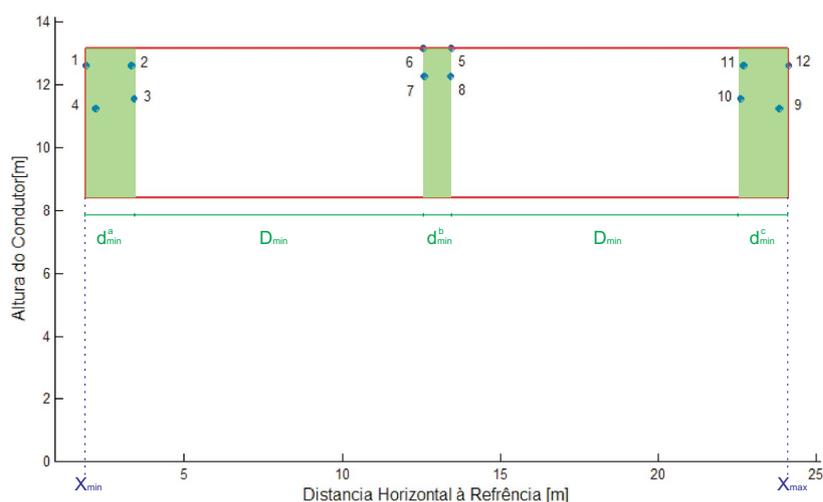


Figura 5.20: Representação das áreas que podem ser ocupadas pelos condutores de cada fase.

Na figura vê-se três áreas verdes que têm suas larguras denominadas  $d_{min}^a$ ,  $d_{min}^b$  e  $d_{min}^c$ . Somando-se as três larguras tem-se uma área denominada  $Soma_d$ . A idéia é que a largura  $d_{min}$  de cada área das fases seja determinada automaticamente pelo

próprio problema. Para isso adota-se o critério  $Soma_d$  conforme expressão abaixo:

$$Soma_d = d_{min}^a + d_{min}^b + d_{min}^c = X_{max} - X_{min} - 2D_{min} \quad (5.16)$$

Substituindo os valores nessa equação, encontra-se que  $Soma_d = 3,21m$ . Os resultados para essa restrição são mostrados na Figura 5.21 e na Tabela 5.9.

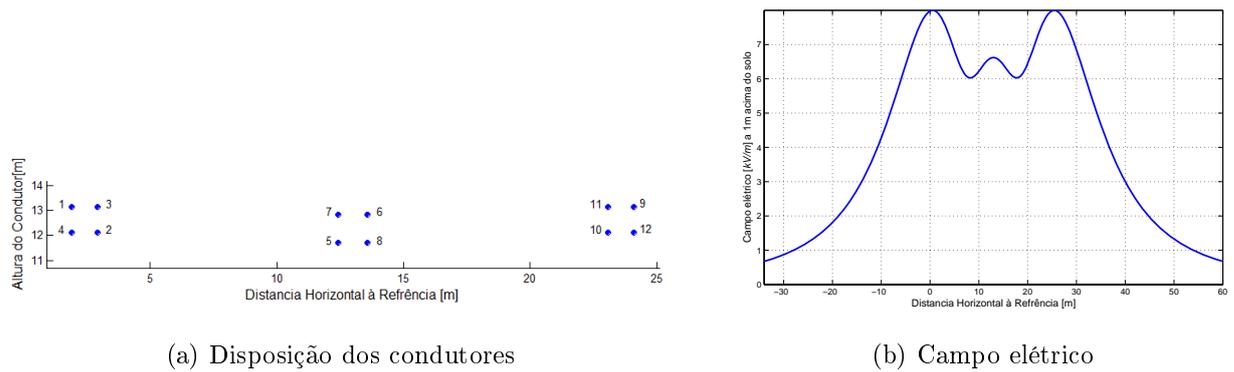


Figura 5.21: Resultado da restrição  $Soma_d \geq 3.3m$ .

Tabela 5.9: Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.21.

$d_{min}^a$ [m]	$d_{min}^b$ [m]	$d_{min}^c$ [m]	$E_{max}$ [kV/m]	$H_{max}$ [A/m]	$P_{natural}$ [MW]
0,9567	1,2966	0,9567	7,9958	27,1087	1186,60

O resultado apresentado na Figura 5.9 confirma a tendência observada no tópico anterior, pois mostra que há um aumento da  $d_{min}$  da fase central em detrimento da diminuição das  $d_{min}$  das fases laterais. Essa característica é justamente oposta à encontrada na linha original.

Confirmada essa tendência, objetivou-se encontrar uma relação entre a  $d_{min}$  da fase central e a  $d_{min}$  das fases laterais que produzisse um valor de pico de campo elétrico capaz obedecer aos limites adotados na Tabela 3.7 e ainda obter um valor de potência natural ainda maior. Para isso foi necessário incrementar ainda mais a restrição do somatório das  $d_{min}$  adotando uma proporção entre as  $d_{min}$  das fases. Essa restrição é implementada pela seguinte equação:

$$d_{min}^a = K_2 \times d_{min}^b \quad (5.17)$$

O melhor resultado conseguido foi utilizando uma proporção  $K_2 = 0,90$ . A disposição dos condutores, o perfil de campo elétrico, os valores de pico de campos e as distâncias mínimas encontrados são apresentados na Figura 5.22 e na Tabela 5.10.

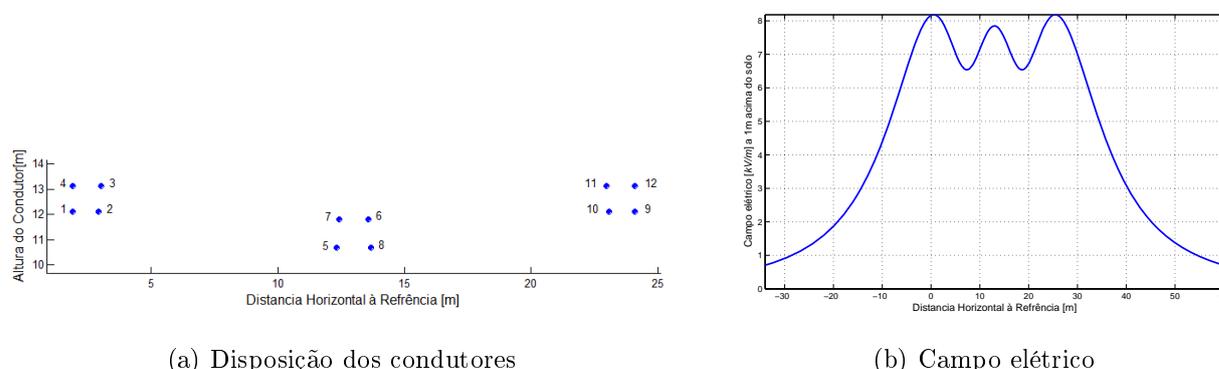


Figura 5.22: Resultado da restrição  $Soma_d \geq 3,3m$  e  $K_2 = 1,4$ .

Tabela 5.10: Campos máximos e potência natural da linha para as disposições da Figura 5.22

$d_{min}^a$ [m]	$d_{min}^b$ [m]	$d_{min}^c$ [m]	$E_{max}$ [kV/m]	$H_{max}$ [A/m]	$P_{natural}$ [MW]
1,0322	1,1456	1,0322	8,1832	28,5162	1195,40

## 5.6 Conclusão

Alguns resultados obtidos apresentam uma grande minimização de campos, mas possuem configurações atípicas de condutores, conforme apresentado nas figuras 5.14(a), 5.14(b), 5.16(b) e 5.16(d), e são de difícil aplicação prática.

Outros resultados proporcionaram a minimização do campo elétrico, mas também provocaram a diminuição da  $P_N$  da linha. Apesar de não parecerem promissoras, as disposições dos condutores sugeridas por esses resultados podem ser aplicadas em situações específicas. Por exemplo, em alguns vãos da linha que passem por centros urbanos onde se deseja diminuir ao máximo os impactos da linha. A aplicação dessas configurações em apenas alguns poucos vãos não comprometem a potência natural da linha. O resultado que proporciona uma diminuição significativa do valor de pico de campo elétrico e, ao mesmo tempo, possui uma simetria de fácil aplicação é apresentado na Figura 5.16(a). Nas figuras 5.23 e 5.24 e na Tabela 5.11 são apresentados os resultados conseguidos com essa disposição considerando a presença dos cabos-guarda.

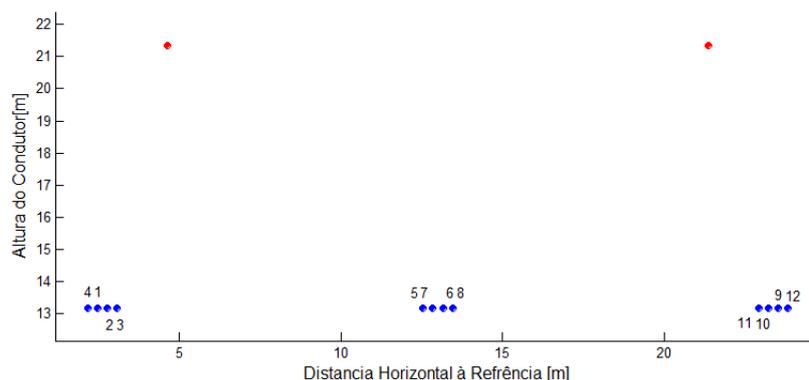
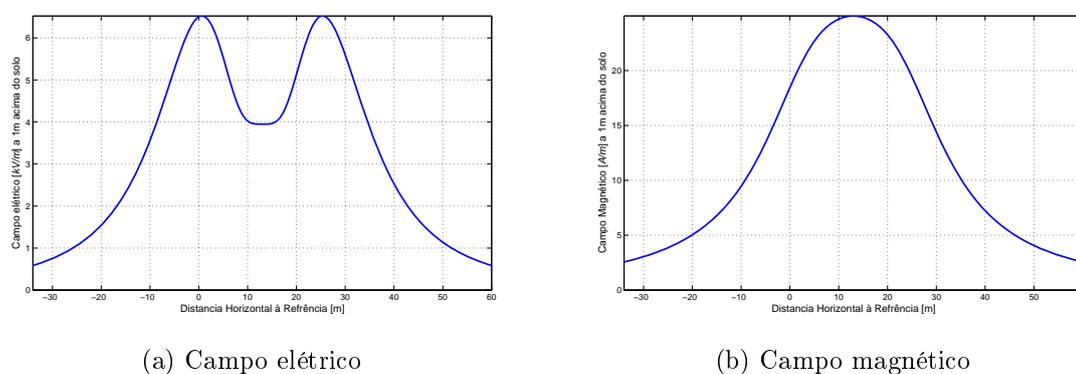


Figura 5.23: Disposição dos condutores para minimização de campo elétrico da LT de 500kV com a presença dos CG.



(a) Campo elétrico

(b) Campo magnético

Figura 5.24: LT 500kV apresentada na Figura 5.23 com minimização de campo elétrico e presença dos CG.

Tabela 5.11: Campos máximos, potência natural e percentual de variação dos campos e da potência natural para as disposições da Figura ??

$E_{max}$ [kV/m]	$H_{max}$ [A/m]	$P_{natural}$ [MW]	$E_{max}$ [%]	$H_{max}$ [%]	* $P_{natural}$ [%]
6,5230	24,9752	985,44	-31,32	-9,50	-18,32

- \*Variação da  $P_{natural}$  aplicando-se essa configuração em todo o comprimento da linha.

Outros resultados aliam a minimização de campos elétricos com uma alta potência natural. Esses tipos de resultados podem ser aplicados ao longo de uma linha sem que haja prejuízo significativo para a  $P_N$ . Um desses resultados é apresentado na Figura 5.21(a). Nas figuras 5.25 e 5.26 e na Tabela 5.12 são apresentados os resultados conseguidos com essa disposição considerando a presença dos cabos-guarda.

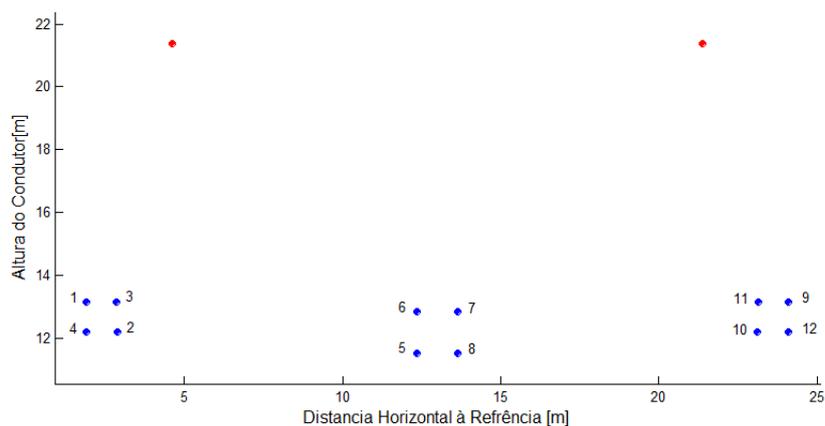
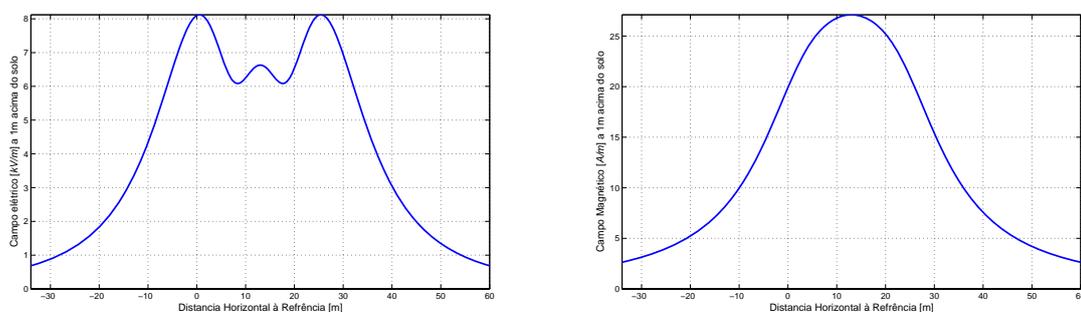


Figura 5.25: Disposição dos condutores para minimização de campo elétrico da LT de 500kV com a presença dos CG.



(a) Campo elétrico

(b) Campo magnético

Figura 5.26: LT 500kV apresentada na Figura 5.25 com minimização de campo elétrico e presença dos CG.

Tabela 5.12: Campos máximos, potência natural e percentual de variação dos campos e da potência natural para as disposições da Figura 5.25.

$E_{max}$ [kV/m]	$H_{max}$ [A/m]	$P_{natural}$ [MW]	$E_{max}$ [%]	$H_{max}$ [%]	$*P_{natural}$ [%]
8,1201	27,1087	1186,60	-14,50	-1,77	-1,64

- \*Variação da  $P_{natural}$  aplicando-se essa configuração em todo o comprimento da linha.

Por último, destaca-se a disposição dos condutores que provocou uma diminuição do valor do campo elétrico e ainda proporcionou uma  $P_N$  mais alta. Esse resultado é apresentado na Figura 5.22(a). Nas figuras 5.27 e 5.28 e na Tabela 5.13 são apresentados os resultados conseguidos com essa disposição considerando a presença dos cabos-guarda.

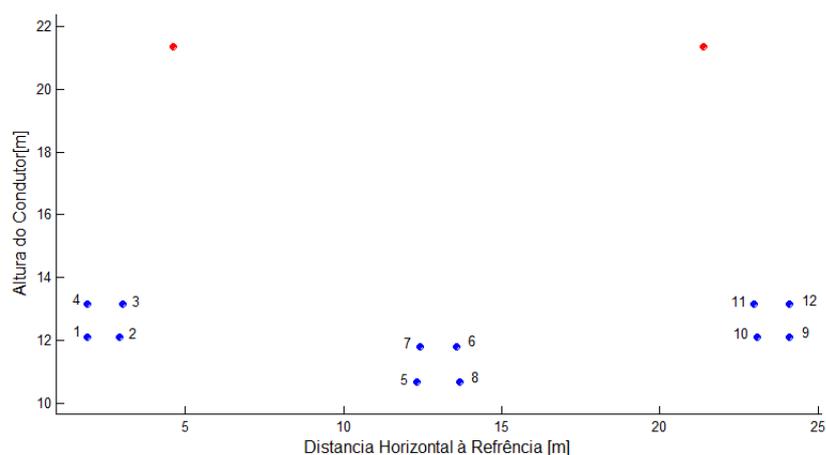


Figura 5.27: Disposição dos condutores para minimização de campo elétrico da LT de 500kV com a presença dos CG.

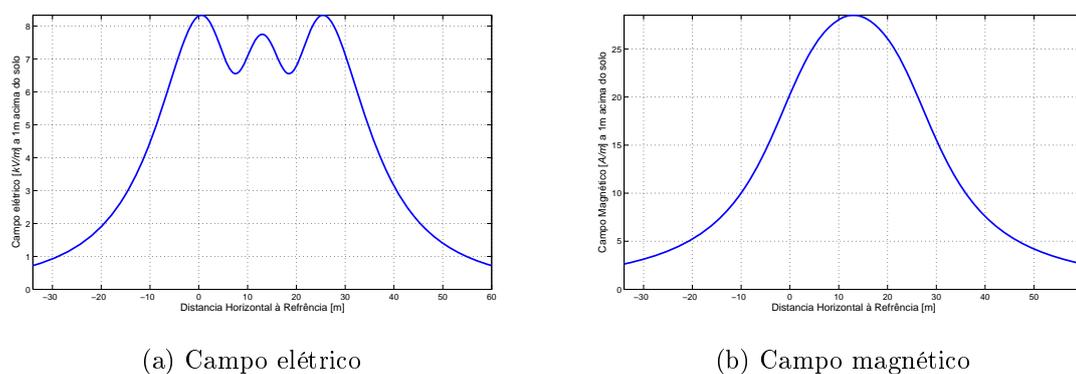


Figura 5.28: LT 500kV apresentada na Figura 5.27 com minimização de campo elétrico e presença dos CG.

Tabela 5.13: Campos máximos, potência natural e percentual de variação dos campos e da potência natural para as disposições da Figura 5.27

$E_{max}$ [kV/m]	$H_{max}$ [A/m]	$P_{natural}$ [MW]	$E_{max}$ [%]	$H_{max}$ [%]	* $P_{natural}$ [%]
8,3300	28,5162	1195,40	-12,28	3,33	-0,79

- \*Variação da  $P_{natural}$  aplicando-se essa configuração em todo o comprimento da linha.

As soluções encontradas comprovam que o rearranjo otimizado de condutores pode ser aplicado para minimização de campos elétricos e magnéticos, com destaque para o primeiro. Os dois últimos resultados são os mais promissores, pois conseguem estabelecer uma potência natural da linha elevada ao mesmo tempo em que mantém os valores máximos de campo elétrico e magnético dentro das recomendações internacionais.

O próximo e último capítulo trata das Conclusões Gerais e Sugestões para Trabalhos

Futuros.

# 6

## CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O aumento da preocupação da população quanto aos efeitos dos campos juntamente com o crescente consumo de energia e a preocupação, por parte das empresas, com os custos demandam soluções que aliem a economia de investimentos com a diminuição dos valores de campos de forma que atendam os limites estabelecidos em norma.

No decorrer deste trabalho foram apresentados novos padrões de disposição de condutores que minimizam os campos eletromagnéticos produzidos pelas linhas de transmissão sem que se necessite modificar as estruturas existentes ou se perca capacidade de transmissão da mesma.

Inicialmente foram apresentados no Capítulo 2 os conceitos fundamentais dos campos de ELF juntamente com uma síntese das pesquisas realizadas ao longo dos anos sobre os efeitos à saúde da exposição a esses tipos de campo. Devido à falta de consenso sobre alguns efeitos causados pelos campos de ELF entende-se que precauções devem ser tomadas a fim de que esses efeitos, mesmo que ainda não comprovados, sejam minimizados.

As normas que tratam da exposição a campos eletromagnéticos foram apresentadas no Capítulo 3 juntamente com alguns conceitos básicos em que são alicerçadas. Comparando-se os resumos das normas e os patamares de exposição definidos por elas, tem-se a confirmação da falta de consenso existente sobre os efeitos da exposição a campos de ELF refletidas nos diferentes limites recomendados. No que se refere aos limites de exposição adotados no Brasil, existe uma norma em fase de discussão que estabelece os limites que deverão ser adotados para exposição do público geral os quais

foram tirados da norma da ICNIRP. A proposta de norma brasileira não abrange a exposição ocupacional, pois entende que é uma prerrogativa do Ministério do Trabalho e Emprego. Sendo assim, sugere-se adotar os limites de exposição ocupacional estabelecidos pela ICNIRP até que sejam definidos os limites legais a serem seguidos no Brasil.

No Capítulo 4 foi apresentado como são realizados os cálculos de campos elétricos e magnéticos produzidos por uma linha de transmissão. Devido aos aspectos construtivos da linha, foi mostrado que para os cálculos desses campos algumas considerações têm que ser adotadas. Observando as expressões completas para o cálculo de campos elétrico (Equação 4.65) e magnético (Equação 4.34) percebe-se claramente a dependência direta dessas equações com as disposições dos condutores e a possibilidade de minimização dos campos utilizando essas mesmas equações como função objetiva do problema.

No Capítulo 5 foram apresentados os resultados obtidos com a minimização de campos através do rearranjo dos condutores da linha. Comparando-se os resultados mostrados nas figuras 5.14 e 5.15 com os das figuras 5.16 e 5.17 percebeu-se que a minimização de campos magnéticos não eram tão promissoras quanto a de campos elétricos. A partir disso focou-se na minimização dos campos elétricos da linha e o acompanhamento da evolução do campo magnético. Dos resultados obtidos com as diferentes restrições adotadas recomenda-se adotar:

- A disposição de condutores da Figura 5.23 para ser aplicada em trechos específicos afim de obter uma diminuição de 31,32% no valor máximo de campo elétrico, 9,50% no valor máximo de campo magnético sem que haja comprometimento da potência natural da linha.
- A disposição mostrada na Figura 5.25 aplicada a todo comprimento da linha afim de proporcionar uma diminuição de 14,50% no valor máximo de campo elétrico, 1,77% no valor máximo de campo magnético, com uma pequena diminuição da potência natural da linha de 1,64%.
- A disposição dos condutores mostrada na Figura 5.27 para ser aplicada, também, em todo comprimento da linha afim de proporcionar uma diminuição de 12,28% no valor máximo de campo elétrico, um pequeno aumento, mas ainda dentro do limite, de 3,33% no valor máximo de campo magnético, com uma diminuição da potência natural da linha de apenas 0,79%.

Como trabalhos futuros ficam:

- A otimização conjunta dos campos elétrico e magnético da linha.
- A otimização dos campos restringindo-se diretamente a potência natural da linha.
- A otimização do campo elétrico considerando a carga dos condutores como uma das variáveis



# PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA - LOQO E AMPL

## A.1 Introdução

Na prática a programação matemática envolve mais que apenas minimização ou maximização da função objetivo para certas equações e inequações de restrição. A existência de inúmeros problemas de otimização na área da engenharia justifica a existência de ferramentas que permitam formular e resolver esses mesmos problemas. Esse apêndice tem por objetivo mostrar um pouco de duas dessas ferramentas que foram de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho. Contudo, este trabalho não vem discutir o problema de otimização, e sim a utilização de ferramentas de otimização para a minimização de campos. Sendo assim, o assunto será abordado de forma objetiva, sem aprofundamentos, apenas para que se possam entender os princípios das ferramentas utilizadas neste trabalho.

## A.2 LOQO

O LOQO é um pacote computacional que tem por objetivo solucionar problemas de programação-não-linear geral, programação quadrática convexa e programação linear. Nele é implementado o método primal-dual de pontos interiores *path-following* juntamente com o método preditor-corretor [48].

De sua primeira versão, em 1991, até à atual, o pacote do LOQO vem sofrendo muitas melhorias e atualizações. Basicamente o programa utiliza as vantagens de utilizar matrizes quase-definidas na solução de sistemas no processamento dos problemas.

Desde o começo foi reconhecida a importância dessas pra a obtenção de algoritmos eficientes para programação quadrática. Na primeira versão, o tratamento das matrizes era dado durante o processo de fatorização da matriz por uma apropriada escolha dos pivôs iniciais. Posteriormente o tratamento foi dado já na redução do próprio sistema.

O LOQO foi escolhido para ser utilizado neste trabalho por ser um pacote reconhecido na solução de problemas não lineares, caso das equações de campo elétrico e magnético, e por ter uma versão para estudante que permitia seu uso, limitado, sem a necessidade da compra do pacote. Para mais informações sobre o programa consultar referência [49].

### A.3 AMPL

A modelagem de determinados problemas é tão fundamental quanto a sua formulação no computador, de forma a que o *software* existente ou a desenvolver possa apresentar uma solução coerente para o problema formulado. A formulação de problemas de grande dimensão e complexidade é auxiliada pela existência de ambientes de programação que permitem que um determinado usuário não só formule e resolva o seu problema, mas também teste os seus próprios códigos [46].

Antes de qualquer algoritmo de otimização ser aplicado, algum esforço deve ser despendido na formulação do modelo e estrutura de dados. Ao contrário do que se possa pensar, a formulação e as etapas de solução utilizadas pelos programas não são as mesmas que as utilizadas pelos seres humanos. Na realidade há muita diferença entre a forma como os seres humanos entendem o problema e a forma pela qual os algoritmos os solucionam. A "tradução" do modelo matemático para de algoritmo é consideravelmente árdua [46].

No método tradicional de tradução, o trabalho é dividido entre homem e máquina. Primeiro a pessoa que entende o modelo escreve um programa que representará a estrutura de dados exigida. Daí um computador compila e executa o programa para criar a forma do algoritmo. Este arranjo é freqüentemente custoso e propenso a erros, pois deve ser depurado por um usuário, muito embora sua saída não seja de fácil entendimento [46].

Em muitos casos de programação linear, a maior parte do algoritmo é dedicada a representação da matriz de coeficiente de restrição. Tipicamente isto é uma matriz

muito esparsa cujo número de linhas e colunas é da ordem de centenas ou milhares, e cujos elementos não nulos aparecem em padrões complicados. Um programa que produz uma representação compacta dos coeficientes é chamado de gerador de matriz. Várias linguagens de programação têm sido projetadas especificamente para serem geradores de matrizes e padrões [46].

Muitas das dificuldades de tradução da forma de modelo para forma de algoritmo podem ser transpostas pelo uso de uma linguagem de modelagem computacional para programação matemática. Uma linguagem de modelagem é indicada para expressar a forma de modelo em uma maneira que possa servir como entrada direta para o sistema. Então a tradução para a forma de algoritmo pode ser realizada inteiramente pelo computador, sem a etapa intermediária de programação. Ao longo do tempo vários desses tradutores foram projetados, dentre eles faz-se um destaque para o AMPL, utilizado neste trabalho [46].

### A.3.1 Funções e operadores

O AMPL - A Mathematical Programming Language - uma linguagem para programação matemática, comparada a outras linguagens, é notável pela generalidade de sua sintaxe e pela similaridade de suas expressões com a notação algébrica. Essa similaridade permite que modelos matemáticos de problemas possam ser escritos num tempo razoável sem exigir grande esforço de aprendizagem da linguagem. Ele oferece uma variedade de tipos e operações para a definição de índices fixos, como também um faixa de expressões lógicas. O AMPL foi inspirado na linguagem protótipo XML [47], mas incorporou muitas mudanças e melhorias[46].

Vários itens podem ser combinados no AMPL em expressos aritméticas e lógicas. Algumas dos operadores lógicos mais utilizados podem ser vistos na Tabela A.1.

Tabela A.1: Operadores lógicos, aritméticos e conjuntos.[46]

Estilo Usual	Estilo Alternativo	Operador	Resultado
<i>if then else</i>		Lógico,Aritmético	Lógico
<i>or</i>		Lógico	Lógico
<i>and</i>		Lógico	Lógico
<i>not(unary)</i>	!	Lógico	Lógico
< <= = <> > >=	< <= == != > >=	Aritmético	Lógico
+ - <i>less</i>		Aritmético	Aritmético
<i>sum prod min max</i>		Aritmético	Aritmético
* / <i>div mod</i>		Aritmético	Aritmético
$\wedge$	**	Aritmético	Aritmético

Além dos operadores lógicos, existem, também, os operadores aritméticos que são utilizados, principalmente, nas expressões das funções objetos e restrições, Tabela A.2.

Tabela A.2: Funções aritméticas e vetoriais.[46]

Comando	Função Matemática
<i>abs(x)</i>	valor absoluto $\Rightarrow  x $
<i>acos(x)</i>	cosseno inverso $\Rightarrow \cos(x)^{-1}$
<i>acosh(x)</i>	cosseno hiperbólico inverso $\Rightarrow \cosh(x)^{-1}$
<i>asin(x)</i>	seno inverso $\Rightarrow \sin(x)^{-1}$
<i>asinh(x)</i>	seno hiperbólico inverso $\Rightarrow \sinh(x)^{-1}$
<i>atan(x)</i>	tangente inversa $\Rightarrow \tan(x)^{-1}$
<i>atanh(x)</i>	tangente hiperbólica inversa $\Rightarrow \tanh(x)^{-1}$
<i>atan2(y, x)</i>	tangente inversa $\Rightarrow \tan(y/x)^{-1}$
<i>cos(x)</i>	cosseno $\Rightarrow \cos(x)$
<i>exp(x)</i>	exponencial $\Rightarrow e^x$
<i>log(x)</i>	logaritmo natural $\Rightarrow \ln(x)$
<i>max(x, y, ...)</i>	máximo entre os argumentos
<i>min(x, y, ...)</i>	mínimo entre os argumentos
<i>sin(x)</i>	seno $\Rightarrow \sin(x)$
<i>sinh(x)</i>	seno hiperbólico $\Rightarrow \sinh(x)^{-1}$
<i>sqrt(x)</i>	raíz quadrada $\Rightarrow \sqrt{x}$
<i>tan(x)</i>	tangente $\Rightarrow \tan(x)$
<i>tanh(x)</i>	tangente hiperbólica $\Rightarrow \tanh(x)$

Existe uma série de comandos que são utilizados na montagem de um problema. Apesar de ser uma linguagem de fácil entendimento, como outras linguagens, é difícil o entendimento do funcionamento vendo seus comandos de forma separada. Sendo

assim, a melhor forma para entender como os operadores relacionados à cima e os restantes dos comandos são utilizados é vê-los aplicados em exemplos simples. Para mais informações a respeito do AMPL consultar a referência [50].

## A.4 Exemplo de aplicação

Um exemplo clássico de problema de programação não linear é a minimização da função de Rosenbrock A.1. A não linearidade da função vem da multiplicação das variáveis na expressão da função.

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (\text{A.1})$$

Observando os termos da função pode-se concluir que, para valores reais de  $x_1$  e  $x_2$ , ambos nunca serão negativos. Observado o segundo termo, que só depende de  $x_1$ , tem-se que seu mínimo ocorre quando a variável é igual a 1. Voltando para o primeiro termo e fazendo  $x_1$  igual a 1, observa-se que esse termo terá seu mínimo quando  $x_2$  for, também, igual a 1. Dessa forma, essa função tem seu mínimo no ponto (1, 1), onde a mesma tem valor zero, conforme Figura A.1.

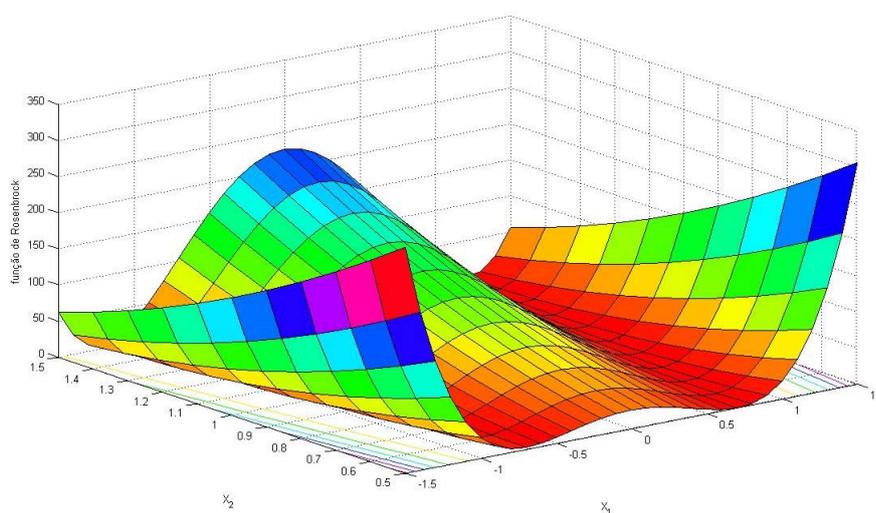


Figura A.1: Função de Rosenbrock.

De forma a se ter um problema de minimização completo, algumas restrições re-

strições devem ser acrescentadas. Dessa forma o problema montado ficará:

$$\begin{aligned} \text{minimize : } & 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \\ \text{sujeito a : } & -1.5 \leq x_1 \leq 1.5 \\ & 0.0 \leq x_2 \leq 1.5 \end{aligned} \tag{A.2}$$

O AMPL faz distinção entre um determinado modelo e os seus dados (arquivos .mod e .dat respectivamente), pois, assim, permite a definição de um modelo genérico e do conjunto de dados. Dessa forma é possível alterar a base de dados sem que seja necessário mexer no modelo do problema e vice-versa. De toda a forma, não é obrigatória a existência de dois arquivos separados para o modelo e dados. A separação em dois arquivos é indicada em problemas mais complexos ou que tenham a necessidade de mudanças constantes na base de dados. Para a minimização da função de Rosenbrock, o arquivo de dados separado do modelo serve apenas para entendimento dos problemas implementados neste trabalho.

Em nossa aplicação utiliza-se a versão para estudante, por ser livre. É uma versão simples que limita o número de variáveis que podem ser utilizadas em 300, além de uma interface em *DOS* pouco amigável. Como nosso número de variáveis não irá chegar a essa grandeza, não representará nenhum problema. Existe também uma versão para Windows que tem uma interface muito mais amigável, porém é paga. Dessa forma os arquivos serão editados num próprio bloco de notas do Windows.

No arquivo de dados pode-se declarar parâmetros simples, vetores ou até tabelas. Nesse caso será implementada uma tabela com os limites e o pontos iniciais das variáveis.

Tabela A.3: Tabela de Parâmetros.

Variável	Limite mínimo	Limite máximo	Ponto inicial
$x_1$	-1.5	1.5	1.3
$x_2$	0.0	1.5	1.3

Sendo assim, cria-se uma tabela, *TAB*, que contém os parâmetros  $Xmin$ ,  $Xmax$ ,  $Xinic$ , onde cada parâmetro possui dois itens, uma para cada variável. Com isso o formato do arquivo de dados fica como mostrado no modelo a Tabela A.4.

Tabela A.4: Arquivo Rosenbrock.dat.

---

```

‡ Arquivo de dados – Parâmetros para função Rosenbrock
set TAB:= 1 2 ;
param: Xmin Xmax Xinic :=
1 -1.5 1.5 1.3
2 0.0 1.5 1.3;

```

---

Podemos-se observar que o caractere ‡ é utilizado para se fazer um comentário. Agora será construído o arquivo modelo. Como está sendo utilizado um arquivo separado para os dados, em primeiro lugar indica-se qual a tabela será utilizada e quais os parâmetros que fazem parte dela. Apesar de já ter sido declarado no arquivo de dados à existência de uma tabela e dos parâmetros, esses últimos só serão associados à respectiva tabela no início do arquivo modelo da Tabela A.5.

Tabela A.5: Arquivo Rosenbrock.mod.

---

```

‡ Arquivo modelo - Função Rosenbrock
set TAB;
param Xinic {TAB} ; ‡X inicial
param Xmin {TAB} ; ‡X mínimo
param Xmax {TAB} ; ‡X máximo

```

---

Depois de indicados os parâmetros declara-se as variáveis do problema juntamente com os seus respectivos pontos iniciais, ver modelo da Tabela A.6.

Tabela A.6: Arquivo Rosenbrock.mod.

---

```

‡ Arquivo modelo - Função Rosenbrock
set TAB;
param Xinic {TAB} ; ‡X inicial
param Xmin {TAB} ; ‡X mínimo
param Xmax {TAB} ; ‡X máximo
var x{p in TAB} ,:=Xinic[p]; ‡ Variável x

```

---

Deve ser observado como é feita a declaração do vetor variável  $x$ . De forma simples, essa notação significa que a quantidade de  $p$  pertencentes à tabela  $TAB$  determinará o número de variáveis utilizadas. Pode-se notar também que o ponto inicial é informado

ao mesmo tempo em que a variável é declarada.

Por fim, resta apenas declarar a função objetivo e as restrições adotadas, conforme modelo da Tabela A.7.

Tabela A.7: Arquivo Rosenbrock.mod.

---

```

‡ Arquivo modelo - Função Rosenbrock
set TAB;
param Xinic {TAB} ; ‡X inicial
param Xmin {TAB} ; ‡X mínimo
param Xmax {TAB} ; ‡X máximo
var x{p in TAB} ,:=Xinic[p]; ‡ Variável x
minimize Rosenbrock: 100*(x[2]-x[1])2+(1-x[1])2; ‡ Função objetivo
subject to Xlim{p in TAB} : Xmin[p]<=x[p]<=Xmax[p]; ‡ Restrição

```

---

De posse dos dois arquivos, basta ordenar a solução do problema. Para isso utiliza-se, como dito anteriormente, a versão estudante do AMPL, juntamente com alguns comandos. Esses comandos devem ser executados em certa ordem para os mesmos sejam entendidos pelo programa, Tabela A.8.

Tabela A.8: Ordem dos comandos para utilização do AMPL

Passos	Comando	Descrição
1	<i>model rosenbrock.mod;</i>	Carrega o modelo
2	<i>data rosenbrock.dat;</i>	Carrega os dados
3	<i>option solver loqo;</i>	Seleciona o programa utilizado**
4	<i>solve;</i>	Executa o modelo carregado utilizado
5	<i>display x;</i>	Visualiza a solução

1. \*Todos os comandos devem ser finalizados com ;.
2. \*\*Existem vários programas utilizados para solução dos problemas. Utilizou-se o LOQO pois foi o programa empregado neste trabalho.

A execução desses passos, juntamente com o resultado podem ser vistos na Figura A.2.

```

C:\Users\Milton\Desktop\Milton\Mestrado\Programação Matemática\LOQO\ampl.exe
ampl: model rosenbrock.mod;
ampl: data rosenbrock.dat;
ampl: option solver loqo;
ampl: solve;
LOQO 6.01: optimal solution (14 iterations, 27 evaluations)
primal objective 1.150548924e-18
dual objective -9.244985222e-09
ampl: display x;
x [*] :=
1 1
2 1
;
ampl: _

```

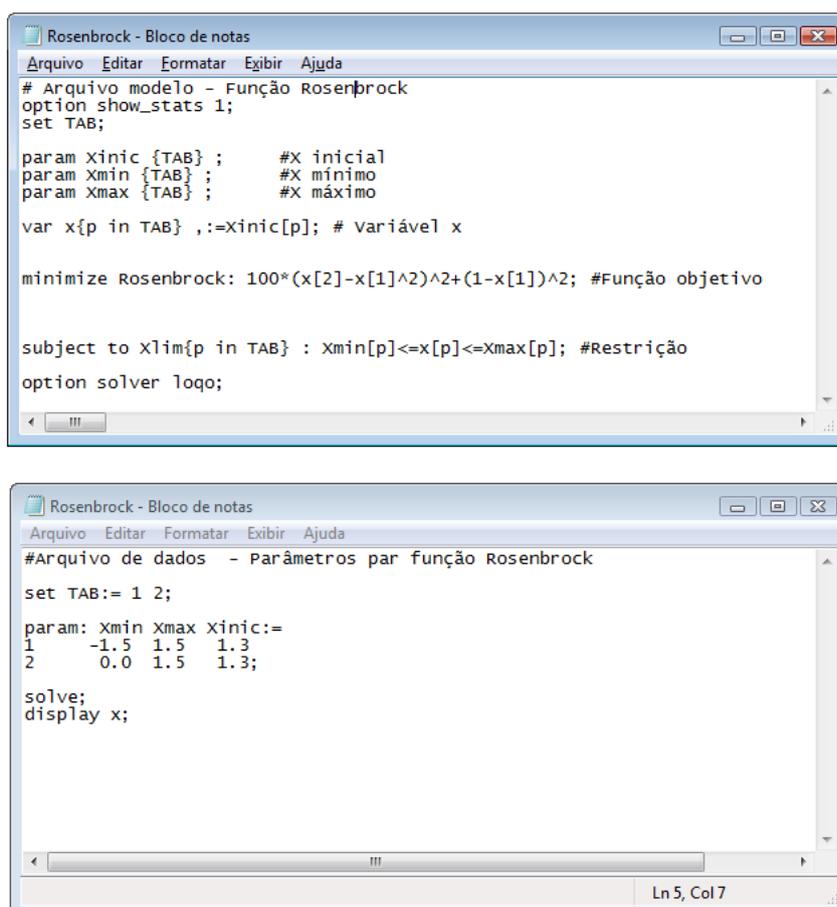
Figura A.2: Tela de execução do AMPL, junto com os resultados.

O processo de execução dos modelos e dados pode ser agilizado com o acréscimo de alguns comandos, citados acima, nos arquivos `.mod` e `.dat`, além de existir uma variedade de comandos que retornar mais informações da execução do programa, Tabela A.9.

Tabela A.9: Acréscimo de comandos nos arquivos `.mod` e `.dat`

Comando	Descrição	Onde utilizar
<code>option show_stats 1;</code>	Retorna dados do problema	Colocar no início do arquivo <code>.mod</code>
<code>option solver loqo;</code>	Seleciona o programa utilizado	Colocar no fim do programa <code>.mod</code>
<code>solve;</code>	Executa o modelo carregado	Colocar no fim do arquivo <code>.dat</code>
<code>display x;</code>	Visualiza a solução	Colocar após o comando <code>solve</code> .

Com o acréscimo desses comandos os arquivos ficam como na Figura A.3.



The figure consists of two screenshots of a text editor window titled 'Rosenbrock - Bloco de notas'. The top screenshot shows the model file (.mod) with the following code:

```
# Arquivo modelo - Função Rosenbrock
option show_stats 1;
set TAB;

param Xinic {TAB};      #X inicial
param Xmin {TAB};      #X mínimo
param Xmax {TAB};      #X máximo

var x{p in TAB} ,:=Xinic[p]; # variável x

minimize Rosenbrock: 100*(x[2]-x[1]^2)^2+(1-x[1])^2; #Função objetivo

subject to xlim{p in TAB} : Xmin[p]<=x[p]<=Xmax[p]; #Restrição

option solver loqo;
```

The bottom screenshot shows the data file (.dat) with the following code:

```
#Arquivo de dados - Parâmetros par função Rosenbrock

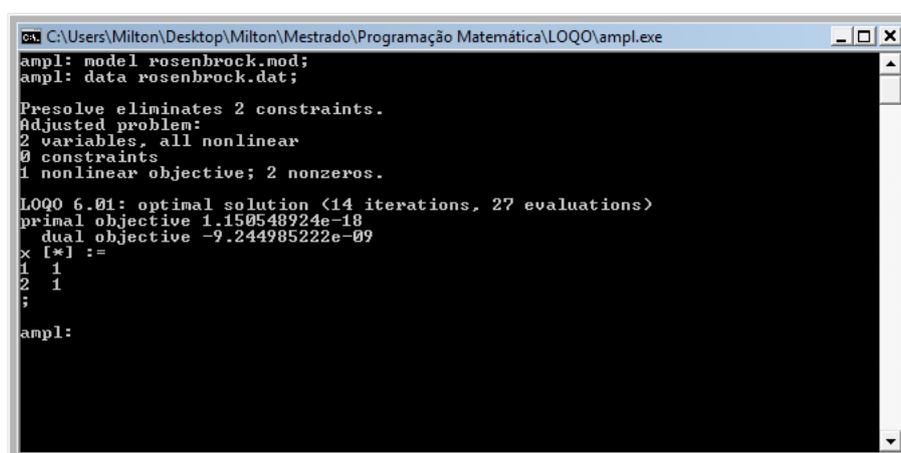
set TAB:= 1 2;

param: Xmin Xmax Xinic:=
1      -1.5  1.5  1.3;
2       0.0  1.5  1.3;

solve;
display x;
```

Figura A.3: Telas dos arquivos .mod e .dat.

A execução e solução do arquivo modificado podem ser vistos na Figura A.4.



The screenshot shows the execution window of the AMPL solver. The command prompt shows the following commands and output:

```
C:\Users\Milton\Desktop\Milton\Mestrado\Programação Matemática\LOQO\ampl.exe
ampl: model rosenbrock.mod;
ampl: data rosenbrock.dat;

Presolve eliminates 2 constraints.
Adjusted problem:
2 variables, all nonlinear
0 constraints
1 nonlinear objective; 2 nonzeros.

LOQO 6.01: optimal solution (14 iterations, 27 evaluations)
primal objective 1.150548924e-18
dual objective -9.244985222e-09
x [*] :=
1 1
2 1
;
ampl:
```

Figura A.4: Tela de execução do AMPL, junto com os resultados.

Existe uma série de comandos, ou parametrização desses, que pode agiliza o processo de execução ou facilitar a análise de dados. Para mais informações consultar referência

[46].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. D. Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica*, 2nd ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1979.
- [2] D. W. Deno, "Transmission Line Fields," *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, vol. PAS-95, no. 5, Oct 1976.
- [3] M. K. Kanya, K. O. Rajesh, P. V. V. Nambudiri, and K. N. Srinivasan, "Computation of Electrical Environmental Effects of Transmission Lines," *IEE High Voltage Engineering Symposium*, no. 467, Aug 1999.
- [4] R. Maruthi, K. Kanunakara, M. K. Kumari, K.M.Srinivasa, and Dr.Channakeshava, "Computation and Measurement of AC Electric and Magnetic Field Lateral Profiles and Longitudinal Contours Under Transmission Lines," *IEE Catalogue nº 95TH8130*.
- [5] R. G. Olsen, D. Deno, and R. S. Baishiki, "Magnetic Fields from Electric Power Lines Theory and Comparison to Measurements," *IEEE Transactions on Power Del*, vol. 3, no. 4, p. 2127-2136, Oct 1988.
- [6] J. Liu, E. Ruan, S. Fortin, and F. P. Dawalibi, "Electromagnetic Fields Near High Voltage Electrical Power Lines: Parametric Analysis," *IEEE*.
- [7] Diretrizes para Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos, Variáveis no Tempo (até 300 GHz), vol. 1, ABRICEM- Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética. ABRICEM, 1999.
- [8] I. L. Organization, "Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields," *International Labour Office; Occupational Safety and Health Series*, no. 69, 1994.
- [9] J. Silny and J. H. B. and, "The influence threshold of a time-varying magnetic field

*in the human organism - Biological effects of static and extremely-low-frequency magnetic fields,* Munich: MMV Medizin Verlag, pp. 105–112, 1986.

- [10] J. H. Cook, C. Graham, H. D. Cohen, and M. M. Gerkovich, “A replication study of human exposure to 60-Hz fields: effects on neurobehavioral measures,” *Bioelectromagnetics*, no. 13, pp. 261–285, 1992.
- [11] P. A. Demers, D. B. Thomas, A. Sternhagen, W. D. Thompson, M. G. M. Curnen, W. Satariano, D. F. Austin, P. Issacson, R. S. Greenber, C. Key, L. K. Kolonel, and D. W. West, “Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men,” *Am. J. Epidemiol.*, no. 132, pp. 775–776, 1991.
- [12] M. Feychting, T. W. Kaune, D. A. Savitz, and A. Ahlbom, “Estimating exposure in studies on residential magnetic fields and cancer,” *Epidemiology*, no. 7, pp. 220–224, 1996.
- [13] J. P. Fulton, S. Cobb, L. Preble, L. Leone, and E. Forman, “Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island,” *Am. J. Epidemiol.*, no. 11, pp. 292–295, 1980.
- [14] C. Graham, R. Cook, H. D. Cohen, and M. M. Gerkovich, “Dose response study of human exposure to 60 Hz electric and magnetic fields,” *Bioelectromagnetics*, no. 15, pp. 447–463, 1994.
- [15] C. Graham, M. R. Cook, D. W. Riffle, M. M. Gerkovich, and H. D. Cohen, “Nocturnal melatonin levels in human volunteers exposed to intermittent 60 Hz magnetic fields,” *Bioelectromagnetics*, no. 17, pp. 263–273, 1996.
- [16] M. L. Lindbohm, M. Hietanen, P. Kyyrönen, M. Sallmen, P. V. Nandelstadh, H. Taskinen, M. Pekkarinen, M. Ylikoski, and K. Hemminki, “Magnetic fields of video display terminals and spontaneous abortion,” *Am. J. Epidemiol.*, no. 136, pp. 1041–1051, 1992.
- [17] M. S. Linet, E. E. Hatch, R. A. Kleinerman, L. L. Robinson, W. T. Kaune, D. R. Friedman, R. K. Severson, C. M. Haines, C. T. Hartsock, S. Niwa, S. Wacholder, and R. E. Tarone, “Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children.” *New Eng. J. Med.*, no. 337, pp. 1–7, 1997.
- [18] S. J. Milham, “Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields,” *New Engl. J. Med.*, no. 307, p. 249, 1982.

- [19] A. B. Miller, T. To, D. A. Agnew, C. Wall, and L. M. Green, “*Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric fields among Ontario electric utility workers,*” *Am. J. Epidemiol.*, no. 144, pp. 150–160, 1996.
- [20] J. C. Murphy, D. A. Kaden, J. Warren, and A. Sivak, “*Power frequency electric fields: a review of genetic toxicology,*” *Mutation Res*, no. 296, pp. 221–240, 1993.
- [21] J. H. Olsen, A. Nielsen, and G. Schulgen, “*Residence near high-voltage facilities and the risk of cancer in children.*” *Danish Cancer Registry; AG-NIR*, pp. 1–26, 1993.
- [22] J. P. Reilly, “*Peripheral nerve stimulation by induced electric currents: exposure to time-varying magnetic fields.*” *Med. Biol. Eng. Computing*, pp. 101–109, 1989.
- [23] I. Ruppe, K. Hentschel, S. Eggert, and S. Goltz, “*Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung von 50 Hz Magnetfeldern,*” *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin-(in German)*, no. 11.003, Fb 1995.
- [24] R. Sander, J. Brinkmann, and B. Kühne, “*Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50 Hz electric and magnetic fields,*” *CIGRE, International Congress on Large High Voltage Electric Systems, Paris*, no. 36-01, 1-9 September 1982.
- [25] D. A. Savitz and A. Ahlbom, “*Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposure,*” *Biologic effects of electric and magnetic fields, Vol. 2. New York: Academic Press*, pp. 233–262, 1994.
- [26] T. M. Schnorr, B. A. Grajewski, R. W. Hornung, M. J. Thun, G. M. Egeland, W. E. Murray, D. L. Conover, and W. E. Halperin, “*Video display terminals and the risk of spontaneous abortion ,*” *New Eng. J. Med.*, no. 324, pp. 727–733, 1991.
- [27] B. Selmaoui, J. Lambrozo, and Y. Touitou, “*Magnetic fields and pineal function in humans: evaluation of nocturnal acute exposure to extremely low frequency magnetic fields on serum melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin circadian rhythms,*” *Life Sci*, no. 58, pp. 1539–1549, 1996.
- [28] G. W. Shaw and L. A. Croen, “*Human adverse reproductive outcomes and electromagnetic fields exposures: review of epidemiologic studies,*” *Environ. Health Persp.*, no. 101, pp. 107–119, 1993.

- [29] T. S. Tenforde and W. T. Kaune, “Interaction of extremely low frequency electric and magnetic with humans,” *Health Phys*, no. 53, pp. 585–606, 1987.
- [30] T. S. Tenforde, “Cellular and molecular pathways of extremely-low-frequency electromagnetic field interactions with living systems,” *Electricity and magnetism in biology and medicine. San Francisco, CA- San Francisco Press*, pp. 1–8, 1993.
- [31] —, “Interaction of ELF magnetic fields with living systems,” *Biological effects of electromagnetic fields - Boca Raton, FL: CRC Press*, pp. 185–230, 1996.
- [32] —, “Biological Interactions of extremely-low-frequency electric and magnetic fields,” *Bioelectromagnetics - Bioenerg*, no. 25, pp. 1–17, 1991.
- [33] L. Tomenius, “50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm county,” *Bioelectromagnetic*, no. 7, pp. 191–207, 1986.
- [34] J. E. Vena, S. Graham, R. Hellman, M. Swanson, and J. Brasure, “Use of electric blankets and risk of post-menopausal breast cancer,” *Am. J. Epidemiol.*, no. 137, pp. 180–185, 1991.
- [35] J. E. Vena, J. L. Freudenheim, J. R. Marshall, R. Laughlin, M. Swanson, and S. Graham, “Risk of premenopausal breast cancer and use of electric blankets,” *Am. J. Epidemiol.*, no. 140, pp. 974–979, 1994.
- [36] U. N. E. Programme, W. H. Organization, and I. R. P. Association, “Extremely low frequency (ELF) fields,” *Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria*, no. 35, 1984.
- [37] —, “Magnetic fields,” *Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria*, no. 69, 1987.
- [38] —, “Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz),” *Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria*, no. 137, 1993.
- [39] N. Wertheimer and E. Leeper, “Electrical wiring configurations and childhood cancer,” *Am. J. Epidemiol*, no. 109, pp. 273–284, 1979.
- [40] R. T. Hitchcock and R. M. Patterson, Radio-frequency and ELF Electromagnetic Energies. John Wiley e Sons, INC., 1995.
- [41] Sadiku and N. O. Matthew, Elementos de Eletromagnetismo, 3rd ed. Bookman, 2004.

- [42] P. U. T. L. G. E. C. P. Massachusetts and A. T. S. E. U. S. E. D. G. E. C. S. N. York, Transmission Line Reference Book 345kV end Above. Electric Power Research Institute, 1975, ch. 8, pp. 248–277.
- [43] J. C. R. Lopes, J. de Melo Camargo, M. Barthus, V. V. Neto, and E. B. Pinto, “*Medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos,*” *EM - Eletricidade Modera*, no. 399, pp. 40–54, Junho 2007.
- [44] IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields (0-3 kHz), Institute of Electrical and Electronics Engineers-IEEE. IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (Standards Coordinating Committee 28) on Non-Ionizing Radiation, October 2002.
- [45] Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic fields (up to 300 GHz), vol. vol.74, no. 4, ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health Physics, April 1998.
- [46] R. Fourer, D. M. Gay, and B. W. Kernighan, AMPL - A Modeling Language for Mathematical Programming. bf - boyd i fraser publishing company, 1993, vol. 1.
- [47] R. Fourer, “*Modeling Languages versus Matrix Generators for Linear Programming,*” *ACM Transactions on Mathematical Software*, no. 9, pp. 143–183, 1983.
- [48] R. J. Vanderbei, “*LOQO - An Interior Point Code For Quadratic Programming,*” Statistics and Operations Research Princeton University - SOR-94-15, Tech. Rep., November 30 1998.
- [49] Vanderbei, “*Robert J. Vanderbei - LOQO,* <http://www.princeton.edu/rvdb>.”
- [50] AMPL, “*AMPL,* <http://www.ampl.com>.”