

WILLIAM DOMINGOS BECKER

**ESTUDO DE TÉCNICAS PARA REDUÇÃO DE
CAMPOS MAGNÉTICOS GERADOS POR LINHAS
DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA**

**FLORIANÓPOLIS
2008**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DE TÉCNICAS PARA REDUÇÃO DE
CAMPOS MAGNÉTICOS GERADOS POR LINHAS
DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

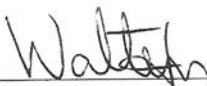
WILLIAM DOMINGOS BECKER

Florianópolis, Agosto de 2008.

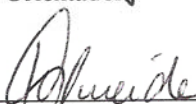
ESTUDO DE TÉCNICAS PARA REDUÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS GERADOS POR LINHAS DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA

William Domingos Becker

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina’.

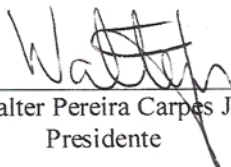


Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.
Orientador

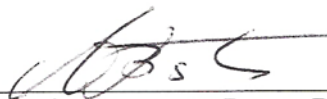


Profª Kátia Campos de Almeida, Dra.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

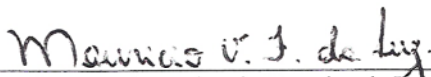
Banca Examinadora:



Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.
Presidente



Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr.



Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.



Prof. Roberto de Souza Salgado, PhD.

Em memória de meus avós,

Maria Pedroso Becker,
Pedro Germano Becker e
José Antônio Domingos.

“Você descobre quem
são seus verdadeiros amigos
quando é o melhor amigo
de si mesmo”.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional durante o curso de mestrado.

Ao CNPq pelo apoio financeiro que permitiu a elaboração desta dissertação.

Ao professor Walter Pereira Carpes Jr. pela orientação, sugestões, compreensão, ensinamentos e dedicação transmitidos durante todo o trabalho.

Ao professor João Pedro Assumpção Bastos pelos ensinamentos, incentivo e importante ajuda.

Aos professores Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Nelson Sadowski, Nelson Jhoe Batistela, Patrick Kuo-Peng e Renato Carlson pela importante ajuda.

À secretária executiva Celly D. Mello pela amizade, prestatividade, empenho e dedicação.

A todos os colegas do GRUCAD pela ajuda durante a fase da dissertação de mestrado, em especial ao pós-doutorando Jean Viane Leite, ao doutorando James Silveira, ao mestrando Diego Botelho e aos alunos de Iniciação Científica Douglas Martins Araújo, André Giovani Leal Furlan e Zhou Si Wei.

Aos meus pais Dimas Agostinho Becker e Sônia Terezinha Domingos pela vida.

Aos meus irmãos, em especial a Richard Domingos Becker e Cíntia Domingos Becker por acreditarem e confiarem em mim.

Aos meus sobrinhos João Gabriel Becker Faria, Maria Júlia Stanga Becker e Arthur Becker Remor pela inocência e pureza a mim transmitida.

A minha eterna companheira Ana Paula Aranalde Kaul pela presença constante em todos os momentos de minha vida.

Ao meu filho Jonathan Corrêa Becker pelo amor, carinho e compreensão.

Ao médico Manoel Campelo Brandão por ter me ajudado a descobrir o verdadeiro trauma de minha vida e por ser muito mais que um amigo.

A todos os meus alunos que sempre acreditaram no meu potencial para a docência e que sabiam que um dia eu concretizaria esta missão.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na concretização deste sonho que me persegue desde os primeiros tempos de minha infância.

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

ESTUDO DE TÉCNICAS PARA REDUÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS GERADOS POR LINHAS DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA

William Domingos Becker

Agosto / 2008

Orientador: Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.

Palavras-Chave: Campos Magnéticos, Campos Elétricos, Mitigação de Campos Magnéticos, Linhas de Transmissão, Sistemas de Potência, Seres Vivos, Efeitos Biológicos.

Número de páginas: 95

RESUMO: Há uma preocupação crescente com os possíveis efeitos dos campos eletromagnéticos ELF (extrema baixa frequência) sobre os seres vivos, tanto por parte de organismos governamentais quanto não governamentais e concessionárias de energia elétrica. A interação entre campos eletromagnéticos ELF e seres vivos é aqui estudada e os pareceres dos órgãos de pesquisa científica referentes às doenças alegadas a estes campos são apresentados. Normas regulamentadoras nacionais e internacionais que estipulam valores máximos de campo elétrico e magnético (público em geral e ocupacional) são apresentadas. Embora o campo magnético seja o foco deste trabalho, o cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão de potência é mostrado ao leitor através do método das cargas equivalentes. Como o objetivo do presente trabalho é reduzir os campos magnéticos gerados por LTs de potência, as topologias de LTs mais comuns são estudadas. Posteriormente, algumas técnicas para redução de campos magnéticos gerados por LTs de potência são estudadas, destacando-se entre elas: elevação da altura, compactação de condutores, balanceamento das correntes de fase, otimização do arranjo de fases, divisão de condutores, transmissão hexafásica, compensação passiva e ativa. Uma análise da eficácia e dos custos para a implantação de cada uma das técnicas estudadas é realizada.

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

STUDY OF TECHNIQUES TO REDUCE MAGNETIC FIELDS FROM POWER TRANSMISSION LINES

William Domingos Becker

August / 2008

Advisor: Prof. Walter Pereira Carpes Jr. Dr.

Keywords: Magnetic Fields, Electric Fields, Mitigation of Magnetic Fields, Transmission Lines, Power Systems, Living Creatures, Biological Effects.

Number of pages: 95

ABSTRACT: Governmental, non governmental organisms and electrical agencies have been interested in the possible effects of ELF (Extremely Low Frequency) electromagnetic fields in living creatures. The interaction between ELF electromagnetic fields and living creatures are studied here and the opinions of scientific research organisms are presented to elucidate the connection between disease and these fields. National and international rules to limit the values of magnetic and electric fields (general people and occupational) are presented too. The electric fields produced by power transmission lines are studied and the method of equivalent charges is introduced. The magnetic fields produced by power transmission lines are studied and the analytical method to calculate them is presented. The most common topologies of power transmission lines are analyzed and some techniques to reduce the magnetic fields produced by them are studied. The most important techniques are: height elevation, compaction of conductors, current balancing, optimization of arrangement of phases, phase splitting, transmission with high order phase systems, passive and active compensation. An analysis of effectiveness and cost are presented to implantation of each technique studied.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas	xiv
Introdução	1
1 Campos eletromagnéticos ELF e seus efeitos em seres vivos	
1.1 Introdução.....	3
1.2 Mecanismos básicos de interação entre campos elétricos e magnéticos e organismos vivos.....	3
1.2.1 Correntes elétricas geradas pela variação da indução magnética.....	3
1.2.2 Correntes elétricas induzidas por campos elétricos.....	5
1.2.3 Movimento de ímãs permanentes.....	6
1.2.4 Força de Lorentz.....	6
1.3 Fontes de campos magnéticos.....	7
1.4 Efeitos biológicos de campos elétricos e magnéticos de extrema baixa frequência (ELF).....	7
1.5 Associação com o câncer.....	8
1.6 Efeitos dos campos eletromagnéticos ELF sobre o organismo humano devido a exposições prolongadas.....	10
1.7 Alguns resultados importantes de pesquisas recentes.....	11
1.7.1 O estudo do CCRG (“Childhood Cancer Research Group”).....	11
1.7.2 Análise agrupada (“Pooled analysis”).....	11
1.7.3 O UKCCS (“The United Kingdom Childhood Cancer Study”).....	12
1.8 Conclusões dos grupos de revisão.....	12
1.8.1 A opinião da NRPB (“National Radiological Protection Board”)...	13
1.8.2 A opinião da IARC (“International Agency for Research on Cancer”).....	13
1.8.3 A opinião da ICNIRP (“International Commission on Non-Ionizing Radiation”).....	14
1.8.4 A opinião da OMS (Organização Mundial de Saúde).....	14
1.9 Câncer em adultos.....	14
1.9.1 A opinião da NRPB.....	14
1.9.2 A opinião da ICNIRP.....	15
1.10 Tumores do sistema nervoso em adultos.....	16
1.11 Câncer de mama em adultos.....	16
1.11.1 A opinião do SCENIHR (“Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks”).....	16
1.11.2 A opinião da OMS.....	16
1.12 Desordem neurodegenerativa.....	17
1.12.1 A opinião da NRPB.....	17
1.12.2 A opinião da ICNIRP.....	17
1.12.3 A opinião do SCENIHR.....	18
1.12.4 A opinião da OMS.....	18
1.13 Esclerose múltipla.....	18
1.14 Doenças do coração.....	18
1.14.1 A opinião da ICNIRP.....	18
1.14.2 A opinião da NRPB.....	19

1.14.3	A opinião do SCENIHR.....	19
1.14.4	A opinião da OMS.....	19
1.15	Suicídio e depressão.....	19
1.15.1	A opinião da ICNIRP.....	20
1.15.2	A opinião da NRPB.....	20
1.16	Efeitos reprodutivos.....	20
1.16.1	A opinião da ICNIRP.....	20
1.16.2	A opinião da NRPB.....	21
1.16.3	A opinião da OMS.....	21
1.17	Hipersensibilidade.....	21
1.17.1	A opinião de Rubin (G. James Rubin et al.).....	22
1.17.2	A opinião da HPA (“Health Protection Agency”).....	22
1.17.3	A opinião da OMS.....	22
1.17.4	A opinião do SCENIHR.....	23
1.18	Exposição dos pais afetando os filhos.....	23
1.18.1	A opinião da NRPB.....	23
1.19	Efeitos em animais e plantas.....	23
1.20	Análise das regulamentações nacionais e internacionais.....	24
1.20.1	Introdução.....	24
1.20.2	O princípio da precaução.....	25
1.20.3	Regulamentações de organizações internacionais.....	25
1.20.3.1	CENELEC (“Comité Européen de Normalisation Electrotechnique”).....	26
1.20.3.2	IEC (“International Electrotechnical Commission”).....	26
1.20.3.3	IEEE (“Institute of Electrical and Electronics Engineers”).....	26
1.20.3.4	ACGIH (“American Conference of Governmental Industrial Hygienists”).....	27
1.20.3.5	ICNIRP.....	27
1.20.4	Regulamentação brasileira.....	28
1.20.5	Conclusão sobre as regulamentações nacionais e internacionais.....	28
1.21	Conclusão.....	29
2	Campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão	
2.1	Introdução.....	30
2.2	Características do campo elétrico gerado por LTs de potência.....	30
2.3	Cálculo do campo elétrico gerado por LTs através do método das cargas equivalentes.....	31
2.3.1	Determinação das cargas equivalentes do condutor.....	32
2.3.2	Cálculo do campo elétrico produzido pelas cargas equivalentes.....	35
2.3.3	Exemplo de cálculo de campo elétrico gerado por uma LT bifásica através das cargas equivalentes.....	36
2.4	Características do campo magnético gerado por LTs de potência.....	39
2.5	Cálculo analítico do campo magnético gerado por LTs de potência.....	39
2.5.1	Cálculo do campo magnético gerado por um fio condutor infinito.....	39
2.5.2	Cálculo do campo magnético produzido pelos condutores de uma LT.....	41
2.5.3	Exemplo de cálculo do campo magnético gerado por uma LT com dois condutores percorridos por corrente.....	43
2.5.4	Casos estudados.....	44

	Indução magnética gerada por um condutor retilíneo infinito.....	45
	Indução magnética gerada por uma LT bifásica horizontal.....	46
	Indução magnética gerada por uma LT trifásica horizontal.....	47
	Indução magnética gerada por uma LT trifásica vertical.....	49
	Indução magnética gerada por uma LT trifásica delta.....	50
	Indução magnética gerada por uma LT trifásica delta invertido.....	51
	Indução magnética gerada por uma LT trifásica delta especial I.....	53
	Indução magnética gerada por uma LT trifásica delta especial II.....	54
	Indução magnética gerada por uma LT trifásica horizontal com circuito duplo.....	56
	Indução magnética gerada por uma LT trifásica vertical com circuito duplo.....	58
2.6	Mapa de induções para um caso particular.....	59
2.7	Conclusão.....	60
3	Técnicas para redução de campos magnéticos gerados por LTs de potência	
3.1	Introdução.....	61
3.2	Introdução às técnicas de redução de campos magnéticos.....	61
3.2.1	Configurações básicas de campo.....	62
3.2.2	Cancelamento parcial do campo magnético.....	62
3.2.3	Campos magnéticos de dois condutores paralelos.....	64
3.2.3.1	Campo magnético de um dipolo plano.....	65
3.2.3.2	Definição de um condutor substituto para um condutor dividido.....	66
3.2.4	Campo magnético devido a um condutor dividido.....	67
3.2.5	Sistema trifásico geral.....	67
3.2.6	Aplicações a LTs de potência existentes.....	68
3.2.7	Conclusões sobre a técnica de divisão de condutores.....	70
3.2.8	Variáveis que afetam os campos magnéticos ELF em LTs de potência.....	70
3.2.9	Princípios para a redução de campos magnéticos ELF gerados por LTs de potência.....	71
3.2.10	Aplicação dos princípios para redução de campos magnéticos ELF em LTs de potência.....	71
3.2.11	Divisão de condutores para a topologia delta.....	77
3.2.11.1	Caso Δ Split (a).....	77
3.2.11.2	Caso Δ Split (b).....	79
3.2.11.3	Caso Δ Split (c).....	80
3.2.12	Aplicação dos princípios para redução de campos magnéticos ELF em LTs de potência para os casos Δ Split.....	82
3.2.13	Redução do campo magnético através da utilização de LTs de ordem de fase superior (LTs polifásicas).....	84
3.2.14	Compensação ativa e passiva de campos magnéticos.....	87
3.3	Conclusão.....	88
	Conclusão geral	90
	Referências bibliográficas	92

Lista de Figuras

1.1	Indução magnética fluindo através do corpo humano.....	4
1.2	Intensidade do campo elétrico na superfície de um modelo humano.....	5
1.3	Indução magnética ao nível do solo com a distância horizontal, para três fontes de campos magnéticos na frequência industrial.....	7
2.1	Sistema de cargas equivalentes.....	32
2.2	Diagrama para o cálculo dos coeficientes de potencial.....	34
2.3	Raio equivalente de um feixe geminado.....	34
2.4	Disposição geométrica do condutor.....	36
2.5	Disposição geométrica de uma LT com duas tensões de alimentação.....	36
2.6	Condutor a percorrido por corrente \dot{I}_a e induções magnéticas (B_{xa} , B_{ya} e B_r) geradas no ponto $P(x,y)$	42
2.7	Condutores A e B de uma LT bifásica e o ponto $P(20 ; 2)$, onde se deseja calcular a intensidade resultante (eficaz) da indução magnética.....	43
2.8	Condutor retilíneo infinito percorrido por uma corrente \dot{I}	45
2.9	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I} = 1000 \angle 0^\circ A$, $h = 12$ m e $y_p = 1$ m.....	46
2.10	LT bifásica horizontal.....	46
2.11	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000 \angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000 \angle 180^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	47
2.12	LT trifásica horizontal.....	48
2.13	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000 \angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000 \angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000 \angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	48
2.14	LT trifásica vertical.....	49
2.15	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000 \angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000 \angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000 \angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	50
2.16	LT trifásica delta.....	50
2.17	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000 \angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000 \angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000 \angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	51
2.18	LT trifásica delta invertido.....	52
2.19	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000 \angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000 \angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000 \angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	53
2.20	LT trifásica delta especial I.....	53
2.21	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000 \angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000 \angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000 \angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	54
2.22	LT trifásica delta especial II.....	55
2.23	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000 \angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000 \angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000 \angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	56
2.24	LT trifásica horizontal com circuito duplo.....	56
2.25	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 500 \angle 0^\circ A$,	

	$i_2 = 500\angle 120^0 A$, $i_3 = 500\angle -120^0 A$, $i_4 = 500\angle 0^0 A$, $i_5 = 500\angle 120^0 A$, $i_6 = 500\angle -120^0 A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	57
2.26	LT trifásica vertical com circuito duplo.....	58
2.27	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $i_1 = 500\angle 0^0 A$, $i_2 = 500\angle 120^0 A$, $i_3 = 500\angle -120^0 A$, $i_4 = 500\angle 0^0 A$, $i_5 = 500\angle 120^0 A$, $i_6 = 500\angle -120^0 A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	59
3.1	Configurações de indução magnética em torno de condutores percorridos por corrente.....	62
3.2	LT trifásica.....	63
3.3	Campo magnético de dois condutores paralelos ou antiparalelos. Definição de um condutor substituto.....	64
3.4	Sistema trifásico generalizado com condutores divididos.....	67
3.5	Conexão de LTs de potência para redução da indução magnética.....	68
3.6	Intensidade da indução magnética calculada como função da distância horizontal em relação ao centro C , para uma LT trifásica com três condutores e a mesma LT com condutores divididos.....	69
3.7	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $i_1 = 500\angle 0^0 A$, $i_2 = 500\angle 120^0 A$, $i_3 = 500\angle -120^0 A$, $i_4 = 500\angle -120^0 A$, $i_5 = 500\angle 120^0 A$, $i_6 = 500\angle 0^0 A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m	76
3.8	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $i_1 = 500\angle 0^0 A$, $i_2 = 500\angle 120^0 A$, $i_3 = 500\angle -120^0 A$, $i_4 = 500\angle -120^0 A$, $i_5 = 500\angle 120^0 A$, $i_6 = 500\angle 0^0 A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m	76
3.9	LT trifásica delta com condutores divididos Δ Split (a).....	77
3.10	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $i_1 = 500\angle 0^0 A$, $i_2 = 500\angle 120^0 A$, $i_3 = 1000\angle -120^0 A$, $i_4 = 500\angle 0^0 A$, $i_5 = 500\angle 120^0 A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	78
3.11	LT trifásica delta com condutores divididos Δ Split (b).....	79
3.12	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $i_1 = 500\angle 0^0 A$, $i_2 = 500\angle 120^0 A$, $i_3 = 1000\angle -120^0 A$, $i_4 = 500\angle 120^0 A$, $i_5 = 500\angle 0^0 A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	80
3.13	LT trifásica delta com condutores divididos Δ Split (c).....	80
3.14	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $i_1 = 333,3\angle 0^0 A$, $i_2 = 333,3\angle 120^0 A$, $i_3 = 333,3\angle 0^0 A$, $i_4 = 333,3\angle 120^0 A$, $i_5 = 333,3\angle 0^0 A$, $i_6 = 333,3\angle 120^0 A$, $i_7 = 1000\angle -120^0 A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	82
3.15	Comparação entre as induções produzidas pelos condutores mais altos de uma LT polifásica (12 fases) e uma LT trifásica de circuito duplo com arranjo de fases otimizado.....	85
3.16	LT hexafásica horizontal.....	86
3.17	Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $i_1 = 500\angle 0^0 A$, $i_2 = 500\angle 60^0 A$, $i_3 = 500\angle 120^0 A$, $i_4 = 500\angle 180^0 A$, $i_5 = 500\angle 240^0 A$, $i_6 = 500\angle 300^0 A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.....	87

Lista de Tabelas

1.1	Valores típicos de condutividades biológicas.....	5
1.2	Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.....	26
1.3	Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.....	27
1.4	Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.....	27
1.5	Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.....	28
1.6	Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.....	28
1.7	Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.....	28
2.1	Mapa de induções magnéticas para $d = 20$ m.....	59
3.1	Efeito do acréscimo na altura da LT.....	72
3.2	Efeito da compactação dos condutores da LT.....	73
3.3	Efeito do desbalanceamento das correntes de fase da LT.....	73
3.4	Efeito da otimização do arranjo de fases da LT.....	75
3.5	Avaliação das opções de projeto.....	77
3.6	Efeito do acréscimo na altura da LT.....	82
3.7	Efeito da compactação dos condutores da LT.....	83
3.8	Efeito do desbalanceamento das correntes de fase da LT.....	83

Lista de Siglas

LT	Linha de Transmissão
DC	Direct Current
MEF	Método de Elementos Finitos
2D	Duas Dimensões
ELF	Extremely Low Frequency
EUA	Estados Unidos da América
SNC	Sistema Nervoso Central
DNA	DeoxyriboNucleic Acid
CIGRÉ	Conseil Internationale des Grands Réseaux Électriques
IRPA	International Radiation Protection Association
OTA	Office of Technology Assessment
EPA	Environmental Protection Agency
RNA	RiboNucleic Acid
CCRG	Childhood Cancer Research Group
UKCCS	The United Kingdom Childhood Cancer Study
NRPB	National Radiological Protection Board
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
WHO	World Health Organization
AGNIR	Advisory Group on Non-Ionizing Radiation
SCENIHR	Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks
DA	Doença de Alzheimer
ELA	Esclerose Lateral Amiotrófica
HPA	Health Protection Agency
SE	Sensibilidade Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Regulamentadora Brasileira
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
OMS	Organização Mundial da Saúde
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hiygenists
NR	Norma Regulamentadora
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
WG	Working Groups
PT	Project Teams
SAR	Specific Absorption Rate
NCGIH	National Conference of Governmental Industrial Hygienists
INIRP	International Non-Ionizing Radiation Protection

Introdução

O interesse no estudo dos campos eletromagnéticos ELF (“Extremely Low Frequency”- Campos de Extrema Baixa Freqüência) produzidos por sistemas de energia elétrica é crescente. Uma das razões diz respeito aos aspectos de compatibilidade eletromagnética, uma vez que tais campos podem causar interferência em aparelhos e em sistemas eletroeletrônicos próximos. Outra razão refere-se às preocupações quanto à saúde pública, uma vez que ainda não há informações suficientes que permitam afirmar que tais campos são completamente sem efeito sobre os seres vivos, principalmente os humanos. Grandes esforços têm sido desenvolvidos no sentido de prever os possíveis efeitos destes campos em seres humanos, principalmente através de estudos epidemiológicos. Com base nesses estudos, instituições regulamentadoras nacionais e internacionais, devidamente credenciadas, estabelecem valores máximos de exposição (público em geral e ocupacional) aos quais os seres humanos podem estar sujeitos.

O número de pessoas que moram nas proximidades de linhas (distribuição e transmissão) é cada vez maior. A ampliação do sistema de energia elétrica, principalmente o de potência, é muitas vezes impossibilitada por demandas judiciais emitidas pela população que mora nas proximidades de linhas de transmissão. Isto ocorre devido ao temor que a população possui em relação aos possíveis efeitos dos campos eletromagnéticos ELF sobre ela própria e sobre os outros seres vivos. Para que a ampliação do sistema possa acontecer, as concessionárias de energia elétrica têm mostrado interesse em se adequar aos valores limite de campos magnético e elétrico estabelecidos pelas instituições nacionais e internacionais credenciadas. Muitos trabalhos científicos e técnicos têm sido desenvolvidos com o intuito de reduzir e/ou limitar a intensidade de campos magnético e elétrico produzidos pelas linhas de transmissão e distribuição. Em termos científicos, há uma maior preocupação em reduzir a intensidade dos campos magnéticos ELF, pois são estes campos que aparentemente têm alguma conexão com alguns tipos de câncer, em especial, a leucemia infantil [9].

O foco deste trabalho está em reduzir a intensidade dos campos magnéticos ELF produzidos pelas linhas de transmissão, em especial as de potência, pois são elas que produzem campos com valores mais significativos e por conseqüência, as que aparentemente representam maior risco à população.

O capítulo 1 trata dos aspectos relacionados à interação entre campos eletromagnéticos ELF e seres vivos. Neste capítulo são apresentadas as opiniões de vários órgãos de pesquisa internacionais relativas às possíveis conexões existentes entre campos eletromagnéticos ELF e doenças em seres humanos, particularmente diversos tipos de câncer. Também são apresentados os valores limite de campo magnético e elétrico ELF (público em geral e ocupacional) definidos por instituições regulamentadoras nacionais e internacionais.

O objetivo do capítulo 2 é dar ao leitor uma noção de como calcular o campo elétrico e o campo magnético gerados por linhas de transmissão de potência. Com relação ao cálculo do campo elétrico, é apresentado o método das cargas equivalentes. O cálculo do campo magnético é feito através de um método analítico, o qual é bastante simples e muito utilizado. Diversas topologias de linhas de transmissão de potência são estudadas neste capítulo. É apresentada a formulação analítica para o cálculo das componentes horizontal e vertical (e também da resultante) da indução magnética gerada pelas topologias de linhas de transmissão estudadas. Os resultados de simulação (caso particular) para cada topologia são apresentados em forma de saída gráfica.

O objetivo do capítulo 3 é apresentar as diversas técnicas utilizadas para a redução dos campos magnéticos gerados pelas linhas de transmissão de potência. Dentre as técnicas utilizadas para a redução da intensidade da indução magnética, destacam-se: elevação da altura da LT, compactação dos condutores da LT, balanceamento das correntes de fase da LT, otimização do arranjo de fases da LT, divisão dos condutores da LT, transmissão polifásica, compensação ativa e passiva. É feito um estudo da eficiência de algumas das técnicas, bem como uma análise de custos para a implantação de cada uma delas na prática.

Capítulo 1 Campos eletromagnéticos ELF e seus efeitos em seres vivos

1.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada uma visão básica da interação entre campos eletromagnéticos ELF (“Extremely Low Frequency”) e seres humanos. Muito tem se falado da conexão existente entre campos eletromagnéticos ELF e um possível aumento no risco de câncer em seres humanos. O objetivo deste capítulo é proporcionar ao leitor uma visão geral sobre as opiniões emitidas por vários órgãos de pesquisa em campos eletromagnéticos ELF e/ou câncer em seres humanos. Cabe ressaltar a crescente preocupação de órgãos governamentais e não governamentais com o assunto, tratando-o como uma questão de saúde pública. Também são apresentadas as regulamentações nacionais e internacionais sobre campos elétricos e magnéticos ELF, nas frequências de 50/60 Hz.

1.2 Mecanismos básicos de interação entre campos elétricos e magnéticos e organismos vivos

Campos magnéticos variáveis no tempo geram correntes ou provocam movimento de íons por causa do campo elétrico induzido. Este é o mecanismo mais estudado de interação entre materiais orgânicos e campos magnéticos [1]. Outro mecanismo está relacionado às forças de Lorentz [2]. Um terceiro mecanismo é a indução de correntes em função de campos elétricos gerados por LTs.

1.2.1 Correntes elétricas geradas pela variação de indução magnética

Para apresentar o primeiro caso, inicia-se com a equação de Maxwell (na forma integral) que relaciona a indução magnética variante no tempo, \vec{B} , com o campo elétrico induzido, \vec{E} :

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1.1)$$

e a relação constitutiva:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.2)$$

Para uma indução magnética variável no tempo e constante na superfície de integração, tem-se:

$$\vec{E} = -\frac{S}{l} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (1.3)$$

e

$$\vec{J} = -\sigma \frac{S}{l} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (1.4)$$

Um homem pode ser representado aproximadamente por um cilindro de 2 m de altura e raio de 0,2 m, com condutividade elétrica corporal média interna de 0,5 S/m. Quando exposto a uma indução magnética típica, com componentes nas direções vertical e horizontal (conforme mostra a fig. 1.1 [1]) de intensidade igual a 10^{-7} T e de frequência igual a 60 Hz, a máxima densidade de corrente induzida, J , é de aproximadamente $3 \mu\text{A}/\text{m}^2$.

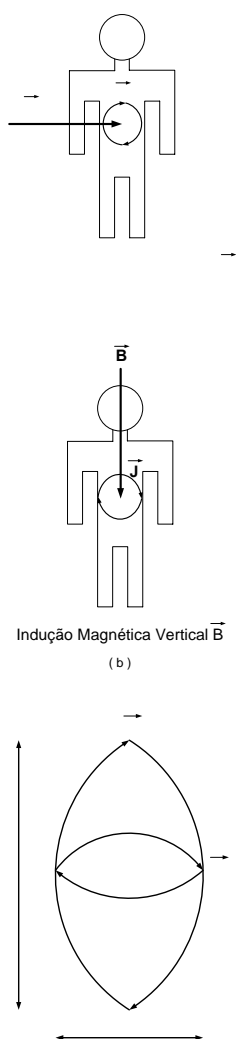


Figura 1.1. Indução magnética fluindo através do corpo humano.
 (a) Indução magnética na direção horizontal.
 (b) Indução magnética na direção vertical.
 (c) Aproximação elipsoidal.

Indução Mag

Na realidade, a distribuição volumétrica das condutâncias no corpo é altamente não-homogênea e as correntes fluem principalmente por caminhos de alta condutividade, tais como vasos sanguíneos, e evitam ossos e regiões adiposas [3]. Adicionalmente, a condutividade dos músculos é assimétrica e varia de 0,08 a 0,6 S/m de acordo com a orientação [4] e, conseqüentemente, a densidade de corrente varia rapidamente com a posição do corpo e com a direção do campo. Alguns valores típicos de condutividades de tecidos biológicos são apresentados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Valores típicos de condutividades biológicas.

Órgão	Condutividade [S/m]
Sangue	0,67
Pulmão	0,05
Fígado	0,14
Gordura	0,04
Osso	0,01
Fluido celular	0,5
Membrana celular	10^{-5} a 10^{-7}

1.2.2 Correntes elétricas induzidas por campos elétricos

Para conhecer possíveis efeitos de campos elétricos no organismo humano, é necessário calcular a intensidade das densidades de corrente induzidas por LTs de potência. Em notação fasorial, a densidade de corrente induzida dentro do corpo humano é dada por:

$$\vec{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E}. \quad (1.5)$$

É bem conhecido que a intensidade do campo elétrico aumenta grandemente nas superfícies das saliências superiores de um objeto condutor [5], como se observa na fig. 1.2, em que, na cabeça, o campo é aumentado em até 18,3 vezes, em relação ao valor do campo nos pés, num modelo de corpo humano com 1,8 m de altura. A fig. 1.2 é um modelo axissimétrico (com simetria de rotação) do corpo humano usado para o cálculo de densidades de corrente e do campo elétrico, assim como da corrente total induzida [6].

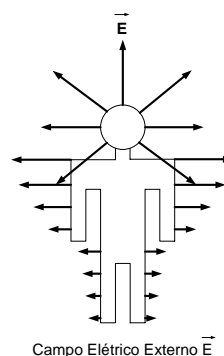


Figura 1.2. Intensidade de campo elétrico na superfície de um modelo humano.

Outra maneira de representar a corrente total induzida em um modelo aterrado na posição ereta é através da expressão:

$$I_t = J_g A; \quad (1.6)$$

onde:

J_g – densidade de corrente média na superfície aterrada do modelo, ou seja, a sola dos pés [A/m^2];

A – área da sola dos pés [m^2].

1.2.3 Movimento de ímãs permanentes

O campo magnético pode afetar as microestruturas ferromagnéticas que os organismos vivos contêm, especialmente no núcleo da hemoglobina, as quais, em campo exterior, são supostas em par e sujeitas a uma força [2]. Estas ações motoras diretas provocam uma troca de energia entre estas microestruturas, bem como pressões mecânicas sobre tecidos circundantes, com variação alternada ao longo do tempo. Tais ações afetam, por exemplo, o sentido de orientação de alguns pássaros, insetos ou bactérias magnetotáteis que contêm cristais de magnetita [2].

Em 1992, Joseph Kirschvink (do Caltech, “California Institute of Technology”) anunciou a separação de cristais de magnetita dos tecidos do cérebro humano e afirmou: “Há magnetita nos tecidos do cérebro humano e é possível que sua presença determine alguns dos efeitos dos campos eletromagnéticos sobre a saúde. Porém, não se conhece os mecanismos de atuação dos campos sobre a saúde”. As dimensões dos cristais estão entre 10 e 70 nm, com alguns chegando a 200 nm. A concentração média é de 4ng de magnetita (em torno de 5 milhões de cristais) por 1 g de tecido cerebral, com valores superiores na membrana meningeal, de 70 ng (100 milhões de cristais) por grama.

1.2.4 Força de Lorentz

Outro mecanismo de interação entre materiais orgânicos e campos magnéticos é a força de Lorentz [3,7]:

$$\vec{F} = q_0(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}); \quad (1.7)$$

onde:

q_0 – carga do íon [C];

\vec{v} - velocidade do íon [m/s].

Esta força atua sobre íons solúveis do fluxo sanguíneo ou do fluxo transmembrânico, especialmente nos processos nervosos.

A apresentação destes mecanismos de interação visa dar uma idéia dos fenômenos de acoplamento existentes entre os campos elétricos e magnéticos e os organismos vivos, fornecendo um ponto de partida para trabalhos posteriores. Particularmente, a indução de

correntes por campos elétricos é de interesse devido aos cálculos de campos elétricos gerados por linhas de transmissão que serão apresentados posteriormente.

1.3 Fontes de campos magnéticos

Valores típicos de induções magnéticas geradas por linhas de transmissão em função da distância são dados na fig. 1.3, que considera três fontes comuns de campos magnéticos na frequência industrial (dispositivos, transmissão e distribuição). As bandas representam variações dentro de fontes individuais de cada grupo [1]. Os campos destas linhas variam com as curvas de carga do sistema e flutuam com a hora do dia e o período do ano. Note-se que poucas pessoas moram perto de linhas de transmissão de alta tensão, que são as mais visíveis e atraem maior atenção. Fica-se exposto muito mais tempo a induções geradas por linhas de distribuição, que alimentam casas e empresas comerciais e industriais, com valores de campos maiores devido à proximidade.

Outra fonte de indução magnética é a fiação das casas ou prédios. As induções magnéticas geradas dependem tanto da intensidade da corrente como da distribuição da fiação. Além disso, as induções magnéticas produzidas pelas fiações da casa são reduzidas se os fios estiverem dentro de um eletroduto de ferro doce [8].

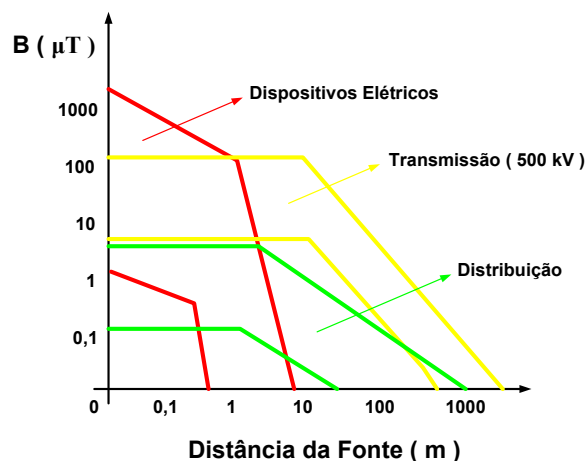


Figura 1.3. Indução magnética ao nível do solo com a distância horizontal, para três fontes de campos magnéticos na frequência industrial [9].

1.4 Efeitos biológicos de campos elétricos e magnéticos ELF

Os informes provenientes da ex-União Soviética e de outros países do Leste Europeu na década de 70, acerca das enfermidades afetando o pessoal de operação de instalações elétricas de alta tensão (500 e 750 kV), iniciaram o debate sobre os efeitos dos campos eletromagnéticos ELF sobre a saúde humana. Na França, Suécia, Inglaterra e EUA, desenvolveram-se na mesma época estudos sobre o impacto ambiental das linhas de extra-alta tensão.

Criaram-se então equipes multidisciplinares reunindo eletricitistas, biólogos, médicos, entre outros pesquisadores, para estudar os efeitos dos campos eletromagnéticos ELF produzidos por instalações de alta potência sobre a saúde humana, cobrindo uma faixa de frequência entre 30 e 300 Hz.

A presença contínua de campos eletromagnéticos ELF nos ambientes transforma potenciais riscos à saúde em matéria de sério interesse científico e de política de saúde pública. O foco principal concentrou-se no câncer, especialmente leucemia e tumores cerebrais, bem como no desenvolvimento de anomalias e, em menor extensão, em desordens no sistema endócrino e nervoso, incluindo depressão crônica.

1.5 Associação com o câncer

Estudos epidemiológicos envolvem o estudo de padrões de doença em populações expostas ao agente de interesse. Dois planos básicos de estudo têm sido usados nos trabalhos referentes a campos eletromagnéticos ELF:

- (i) Estudo retrospectivo de caso-controle, comparando uma população de casos existentes (um grupo de pessoas com a doença) com um grupo de controle (as pessoas sem a doença) selecionado por ser similar em todas as outras características. Exposições passadas ao agente suspeito são comparadas nos dois grupos e relacionadas com a incidência da doença.
- (ii) O segundo tipo calcula a taxa de mortalidade (ou incidência) proporcional, a qual compara a mortalidade (ou incidência da doença) na amostra da população pesquisada com aquela no público geral.

Ambos os planos envolvem problemas e influências que deverão ser descartadas antes que qualquer associação seja feita entre a exposição e o risco à saúde. Estudos epidemiológicos podem somente demonstrar associação.

Um obstáculo para o estudo da influência dos campos eletromagnéticos ELF aparece com a dificuldade de se encontrar ambientes com pouca exposição a campos deste tipo.

Em estudos ocupacionais, outras exposições, tais como químicas, presentes no local de trabalho, confundem os resultados. O ponto a notar é que a tendência total é uma taxa de risco maior que 1, apesar de apenas levemente, para uma associação entre campo eletromagnético ELF e câncer [9].

O risco relativo é uma relação (razão) da probabilidade do evento ocorrer no grupo exposto contra o grupo de controle (não exposto). Na estatística e na epidemiologia matemática, risco relativo (RR - relative risk) é o risco de um evento (ou de desenvolver uma doença) relativo à exposição:

$$RR = \frac{P_{\text{exposto}}}{P_{\text{controle}}}$$

Por exemplo, se a probabilidade de um morador próximo a uma LT de alta tensão em desenvolver leucemia é de 20% e a probabilidade de um morador distante é de 10%, então o risco relativo de leucemia associado ao local de moradia seria igual a 2. Em outras palavras, os moradores próximos às LTs de alta tensão teriam duas vezes mais chances de desenvolver leucemia que os moradores distantes.

De cinco estudos nos Estados Unidos, para a correlação entre câncer em crianças e exposição a campos eletromagnéticos ELF, um não encontrou nenhum aumento na incidência de câncer; e em outros quatro, cada um envolvendo mais de 350 casos de

câncer, a taxa de risco variava entre 1,4 (para todos os tipos de câncer) e 3,7 (para tumores no sistema nervoso central) [9].

Numerosos estudos examinaram a questão entre o câncer e a exposição a campos eletromagnéticos ELF em adultos, especialmente aqueles com maior exposição que o resto da população, devido a suas ocupações. Apesar de a leucemia ser a mais examinada, a associação com tumores cerebrais é a mais estreita. Em geral, os estudos indicam uma fraca, porém definitiva associação entre ocupações mais expostas a campos eletromagnéticos ELF e câncer no cérebro [9].

Doze estudos americanos examinaram a questão da exposição ocupacional a campos eletromagnéticos ELF e leucemia. Todos eles mostraram um aumento do risco de leucemia, de 1,4 a 3,2, quando todos os tipos de leucemia são considerados [9].

A pesquisa mais extensa ocorre com os trabalhadores em telefonia de New York, trabalho este conduzido por Genevieve Matanoski e colaboradores da Universidade John Hopkins, envolvendo 50.582 empregados homens com uma idade média de 40 anos. Ela mostra um risco maior de leucemia para jovens trabalhadores que continuam na companhia telefônica. Particularmente, emendadores de cabo (grupo com mais alta exposição) mostraram a mais alta incidência de câncer, tanto para leucemia (sete vezes mais do que para quem não trabalha em linhas), como para todos os tipos de câncer, incluindo aqueles do sistema gastrointestinal, próstata e cérebro [9].

De outros oito estudos ocupacionais (dois na Grã-Bretanha, um na Nova Zelândia e cinco na Suíça), dois estudos suíços não encontraram nenhuma associação significativa entre leucemia e exposição a campos eletromagnéticos ELF, enquanto que os outros mostraram uma associação com taxas de risco entre 1,3 e 3,8 [9].

Onze estudos procuram ligar tumores cerebrais e exposição a campos eletromagnéticos ELF, dos quais cinco estudos fazem parte de pesquisas já citadas e outras se restringem à questão do câncer no cérebro e exposição ocupacional nos Estados Unidos. Todas as pesquisas mostraram risco relativo variando de 1,5 a 8. Dois estudos associaram um risco crescente com a maior probabilidade de exposição aos campos eletromagnéticos ELF, baseado no tipo de trabalho. Já nos cinco estudos ocupacionais feitos na Suécia (quatro deles relativos à incidência de câncer em eletricitários e um examinando a distribuição ocupacional em 4000 tumores cerebrais), não se encontrou nenhum risco excessivo para o sistema nervoso central (SNC) ou câncer no cérebro, em ocupações elétricas [9].

Apesar dos dados que indicam certa associação entre câncer no cérebro com exposições a campos eletromagnéticos ELF, tal associação não necessariamente indica uma relação rigorosa de causa-efeito. Isto porque existem outros agentes atuando concomitantemente, mesmo que os campos elétricos e magnéticos possam aumentar a ação de outros agentes cancerígenos [9].

Teorias correntes de carcinogênese defendem que a formação de tumores envolve ao menos dois estágios, chamados iniciação e promoção. Na iniciação, o ácido desoxirribonucléico (DNA) no núcleo celular é rompido por um agente externo, produzindo DNA anormal que leva à formação de proteínas anormais e, finalmente, a disfunções celulares. A iniciação requer considerável energia para quebrar as ligações químicas do DNA, muito mais do que é disponível nos campos eletromagnéticos ELF de interesse [9].

Na promoção, o período de latência entre a exposição ao agente cancerígeno e a manifestação do câncer indica que o dano não poderia se expressar como um tumor, a menos que outro processo de promoção acontecesse, dando à célula transformada uma vantagem de crescimento. Deste modo, se campos eletromagnéticos ELF afetam o câncer,

eles podem atuar como promotores. Isto pode ser seletivo pelo tipo de câncer ou o processo geral, levando a um crescimento do câncer mais rapidamente [9].

1.6 Efeitos dos campos eletromagnéticos ELF sobre o organismo humano devido a exposições prolongadas

O atual conhecimento sobre os efeitos dos campos elétricos e magnéticos ELF no organismo humano é fragmentado, não permitindo uma teoria coerente para explicar as observações. Se por um lado se conhece razoavelmente a formulação das interações entre os campos elétricos e magnéticos com os organismos vivos, conhece-se pouco das repercussões de seus efeitos no organismo. A maior preocupação é a associação entre campos eletromagnéticos ELF e o câncer. Por esta razão, vários grupos emitiram pareceres sobre o tema.

O informe do grupo de pesquisadores do CIGRÉ, reunido em Paris, em 1990, apresentou em sua conclusão, que não existem evidências persuasivas de que a exposição a campos eletromagnéticos ELF pode provocar o câncer e qualquer relação entre ambos é questionável (Grupo CIGRÉ, 1991). Conclusão semelhante expressa a Associação Internacional de Proteção à Radiação (IRPA), em 1990, de que estudos biológicos não determinam uma base para estabelecer os limites de exposição humana. Os padrões da IRPA são determinados em função de correntes induzidas por campos elétricos e magnéticos e alguns efeitos de contato [6].

Pesquisadores da Universidade Carnegie Mellon, em Pittsburgh, organizaram um informe para o “Office of Technology Assessment (OTA) of the U.S. Congress”, que concluía: “Não se pode afirmar categoricamente que não existem riscos para a saúde devido à exposição crônica a campos eletromagnéticos ELF. Porém, não há fundamentos para se declarar a existência de um risco significativo” [10]. A agência de Proteção ao Meio Ambiente (EPA) dos EUA, avalia a exposição eletromagnética como “possível cancerígeno” (A terceira categoria de uma escala de cinco, conhecida como cancerígeno, provável cancerígeno, possível cancerígeno, não classificado como cancerígeno e sem evidências de cancerogenicidade).

A maior concentração de esforços para qualificar a ação dos campos eletromagnéticos se dá na sua associação com o câncer. Porém, existem outros efeitos encontrados na literatura especializada, que merecem ser considerados: influências sobre o influxo nervoso; a alteração do fluxo de cálcio através da membrana; a alteração da secreção de melatonina pela glândula pineal; alterações do DNA, RNA e da síntese de proteínas que podem ser as causas dos distúrbios psíquicos, de visão, depressão, debilidade, cansaço e perda de cálcio [11].

Se existem os alegados efeitos devidos a campos eletromagnéticos ELF, estes são sutis. A relação entre campos eletromagnéticos ELF e o câncer, se existir, é muito pequena, apesar de que para crianças, alguns pesquisadores acreditem em um aumento no risco de leucemia [9]. Os efeitos parecem ser mais evidentes com relação aos distúrbios psíquicos, de vista, depressão, debilidade e cansaço. Nesta área, deveria ser feito um estudo mais rigoroso, de como os campos eletromagnéticos ELF alteram o humor das pessoas. É um efeito mais sutil que o câncer, porém, talvez, de maior importância pela prolongada exposição a campos eletromagnéticos ELF, das mais variadas intensidades e direções, a que as pessoas são submetidas diariamente.

1.7 Alguns resultados importantes de pesquisas recentes

Muitas pesquisas sobre a conexão entre campos eletromagnéticos ELF e câncer (leucemia infantil) têm sido realizadas. Abaixo são apresentados importantes resultados obtidos pelos principais grupos de pesquisa mundiais, os quais estão situados principalmente no Reino Unido.

1.7.1 O estudo do CCRG (“Childhood Cancer Research Group”)

Este estudo é uma colaboração entre o CCRG da Universidade de Oxford e o “National Grid – United Kingdom”. Ele procura descobrir e estudar crianças que possuem câncer e que nasceram perto de linhas de transmissão de alta tensão. O estudo afirmou [12]:

“Enquanto poucas crianças no Reino Unido vivem próximas de linhas de transmissão de alta tensão no nascimento, há uma tendência do endereço de nascimento da criança estar associado à leucemia e à proximidade destas linhas de transmissão”.

O mais estranho é que estes resultados se estendem muito além das linhas de transmissão (até 600 m), onde os campos eletromagnéticos ELF são muito fracos. Os autores dizem [12]:

“... nossos resultados parecem não ser compatíveis com os dados existentes na relação entre campos eletromagnéticos ELF e riscos”.

“Nós não temos nenhuma explicação satisfatória para nossos resultados em termos de causa por campo eletromagnético ELF ou associação com outros fatores”.

Desta forma, este resultado sugere que, se algo está acontecendo perto das linhas de transmissão, podem não ser os campos eletromagnéticos ELF. Pode ser outra coisa, talvez uma outra característica das áreas pelas quais as linhas de transmissão passam.

1.7.2 Análise agrupada (“Pooled analysis”)

Em 2000, um grupo internacional, liderado pelo professor Anders Ahlbom, da Suécia, tomou todos os estudos epidemiológicos recentes de leucemia infantil e campos eletromagnéticos ELF separadamente e reuniu os resultados. Ou seja, este trabalho foi uma única reanálise de todos os dados disponíveis. Eles descobriram que, estatisticamente, há uma pequena ou nenhuma sugestão de um risco aumentado devido aos campos eletromagnéticos ELF que a maioria das crianças está exposta. Entretanto, o estudo encontrou, em residências com uma intensidade de indução magnética média maior que 0,4 μ T durante 24 horas (o qual afeta menos que 0,5 % das crianças no Reino Unido), uma sugestão estatística de risco aumentado. Algumas dessas residências estão próximas às linhas de transmissão, mas muitas não estão. Eles concluíram [13]:

“A explicação para risco aumentado não é conhecida, mas o desvio de seleção tem contribuído para parte deste aumento”.

1.7.3 O UKCCS (“The United Kingdom Childhood Cancer Study”)

O maior de todos os estudos epidemiológicos de campos eletromagnéticos ELF e câncer infantil foi conduzido pelo UKCCS durante a década de 90. O UKCCS procurou por uma série de causas do câncer infantil, incluindo os campos eletromagnéticos ELF. Sua população de estudo particularmente grande (mais de 2000 casos de câncer no total), três vezes maior que o estudo antecessor, deu envergadura aos resultados do estudo. Esta pesquisa foi conduzida por um eminente grupo de cientistas, liderados por Richard Doll, que foi o primeiro a identificar a conexão entre o cigarro e o câncer de pulmão [14].

O UKCCS foi idealizado para mapear todos os casos de leucemia infantil no Reino Unido, em um período de quatro anos. É difícil realizar um estudo mais capaz de dar respostas compreensíveis a cerca do câncer infantil no Reino Unido, e se há uma conexão com os campos eletromagnéticos ELF. Este estudo foi idealizado para isso.

O estudo procurou por três diferentes aspectos dos campos eletromagnéticos ELF [14]:

Primeiramente, em Dezembro de 1999, o UKCCS publicou seu relatório relacionado à exposição a campos eletromagnéticos ELF e concluiu [14]:

“Este estudo não fornece nenhuma evidência de que a exposição a campos eletromagnéticos ELF associados com fontes de eletricidade no Reino Unido aumente o risco de leucemia infantil, câncer do sistema nervoso, ou qualquer outro câncer infantil”.

Posteriormente, em novembro de 2000, o UKCCS procurou por crianças vivendo perto de linhas de transmissão e concluiu [14]:

“Não há nenhuma evidência de que a proximidade a instalações elétricas ou níveis de campos eletromagnéticos ELF por elas produzidos no Reino Unido esteja associada com o aumento do risco de leucemia infantil ou qualquer outro tipo de câncer”.

Finalmente, em Novembro de 2002, o UKCCS publicou seu relatório sobre campos eletromagnéticos ELF e concluiu [14]:

“Resumidamente, este estudo piloto não fornece nenhum suporte para a hipótese de que a exposição residencial aos campos eletromagnéticos ELF está associada com o câncer infantil... Isto nos leva a seguir outros caminhos que mostrem a conexão com o câncer infantil”.

1.8 Conclusões dos grupos de revisão

Os grupos de revisão recebem todos os resultados emitidos pelos grupos de pesquisa mundiais sobre a conexão entre o câncer (principalmente leucemia infantil) e os campos eletromagnéticos ELF, e procuram estabelecer uma opinião mais consistente sobre o assunto. Abaixo são apresentadas as opiniões dos principais grupos de revisão mundiais.

1.8.1 A opinião da NRPB (“National Radiological Protection Board”)

Na maior revisão de evidências para uma possível associação entre campos eletromagnéticos ELF e a incidência de câncer, publicada em março de 2001, a NRPB concluiu [15]:

“Experimentos laboratoriais não têm fornecido nenhuma boa evidência de que campos eletromagnéticos ELF são capazes de produzir câncer, nem estudos epidemiológicos em humanos sugerem que eles causem câncer em geral. Entretanto, há alguma evidência epidemiológica de que a exposição prolongada a altos níveis de campo eletromagnético ELF esteja associada a um pequeno risco de leucemia nas crianças. Na prática, tais níveis de exposição raramente são encontrados pelo público em geral no Reino Unido. Na ausência de evidência clara de um efeito cancerígeno em adultos, ou de uma explanação plausível dos experimentos em animais ou células isoladas, a evidência epidemiológica não é forte o suficiente para justificar uma firme conclusão de que tais campos magnéticos causem leucemia em crianças”.

Em seu novo alerta sobre limites de exposição, em 2004, a NRPB declarou [15]:

“Na visão da NRPB, a evidência epidemiológica de que uma exposição prolongada a induções magnéticas ELF, de intensidades maiores que $0,4 \mu\text{T}$, está associada a um risco pequeno e absoluto de leucemia em crianças é, até o presente momento, uma observação para a qual não há nada concreto cientificamente falando. Não há nenhuma evidência clara de um efeito cancerígeno dos campos eletromagnéticos ELF em adultos e nenhuma explanação biológica plausível da associação que pode ser obtida de experimentos com animais ou de estudos com células ou moléculas. Explicações alternativas para esta associação epidemiológica são possíveis. Por exemplo, o desvio potencial na seleção de controle de crianças com casos de leucemia esteve presente em alguns estudos e, por consequência, variações prováveis resultantes de um pequeno número de indivíduos afetados. Portanto, qualquer julgamento baseado na hipótese de que a associação é causal estaria sujeito a um elevado nível de incerteza”.

1.8.2 A opinião da IARC (“International Agency for Research on Cancer”)

A IARC é uma agência da OMS (Organização Mundial da Saúde). Sua unidade de identificação e avaliação tem, desde 1972, publicado periodicamente monografias que evidenciam os vários agentes que são cancerígenos e os classificam. Em junho de 2001, um grupo de trabalho considerou campos eletromagnéticos ELF estáticos. Os resultados completos foram publicados na monografia número 80. Campos eletromagnéticos ELF foram classificados como possivelmente cancerígenos. Isto foi baseado na evidência limitada de humanos relativa à leucemia infantil. Para todos os outros tipos de câncer, incluindo todos os tipos de câncer em adultos, a classificação foi de evidência inadequada de humanos e evidência inadequada de animais [16].

1.8.3 A opinião da ICNIRP (“International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection”)

A maior revisão em epidemiologia publicada pela ICNIRP, em 2001, concluiu [17]:

“Seguindo o relatório original de Wertheimer e Leeper, unindo as três formas mais comuns de câncer infantil com campos eletromagnéticos ELF residenciais, mais de 18 estudos em 9 países não mostraram nenhuma evidência convincente de uma relação entre leucemia infantil e exposições a estes campos, com intensidades de indução magnética abaixo de $0,2 \mu\text{T}$. Um aumento de 2 % no risco relativo de leucemia infantil, limitado a uma pequena fração de crianças (estimada em 0,8 % de uma ampla análise global) com exposições a campos eletromagnéticos ELF residenciais, com intensidades de indução magnética maiores ou iguais a $0,4 \mu\text{T}$, é difícil de interpretar na ausência de mecanismo biológico ou suporte experimental de reprodução cancerígeno. Há também alguma evidência que sugere que o desvio de seleção pode contribuir para algum incremento no risco entre a proporção de crianças com exposição residencial a campos eletromagnéticos ELF elevados”.

1.8.4 A opinião da OMS

A monografia do critério de saúde ambiental da OMS, publicada em 2007, concluiu [18]:

“A classificação da IARC foi fortemente influenciada pelas associações observadas em estudos epidemiológicos em leucemia infantil. A classificação desta evidência como limitada não muda com a adição de dois estudos de leucemia infantil, publicados após 2002. Desde a publicação da monografia da IARC, a evidência para outros tipos de câncer infantis permanece inadequada. Concluindo: Novos estudos com humanos, animais e estudos *in vitro*, publicados desde a monografia da IARC de 2002, não mudam a classificação de campos eletromagnéticos ELF como possíveis agentes cancerígenos de humanos”.

1.9 Câncer em adultos

Muito trabalho tem sido feito na investigação da conexão entre tipos de câncer em adultos e a exposição ocupacional a campos eletromagnéticos ELF. Abaixo são apresentadas as opiniões dos grupos de revisão mais importantes mundialmente.

1.9.1 A opinião da NRPB

A conclusão do relatório do grupo de advertência da NRPB, de 2001, com relação à exposição ocupacional, é em parte [15]:

“O estudo de populações expostas ocupacionalmente a campos eletromagnéticos ELF pode incluir grupos expostos geralmente a níveis mais elevados do que membros do público. Eles podem, portanto, ter um grande potencial para detectar

quaisquer efeitos adversos de saúde. Embora recentemente tenham sido publicados estudos de exposição ocupacional a campos eletromagnéticos ELF e risco de câncer, e muitos deles tenham considerável poder estatístico, relações causais entre a exposição a estes campos e um aumento na incidência de tumores não estão estabelecidas”.

O alerta da NRPB de 2004, com relação a limites de exposição, estabeleceu [15]:

“Não há nenhuma evidência clara de um efeito cancerígeno dos campos eletromagnéticos ELF em adultos”...

A revisão de acompanhamento de evidência científica dá maiores detalhes, incluindo as seguintes declarações [15]:

“O AGNIR (“Advisory Group on Non-Ionizing Radiation”) não encontrou nenhuma razão para acreditar que a exposição a campos eletromagnéticos ELF residenciais esteja envolvida com o desenvolvimento de leucemia ou tumores no cérebro” [19]...

“Além disso, estudos do câncer de mama e exposições a campos eletromagnéticos ELF residenciais, baseados em medidas residenciais, não têm geralmente mostrado associações”...

“Estudos mais recentes de trabalhadores expostos aos campos eletromagnéticos ELF não têm geralmente mostrado aumento nos riscos de leucemia ou câncer no cérebro”...

1.9.2 A opinião da ICNIRP

A maior revisão de epidemiologia publicada pela ICNIRP, em 2001, concluiu [17]:

Leucemia em adultos:

“Os resultados destes estudos têm se estendido desde nenhuma associação até associações positivas consideráveis, com riscos relativos na categoria máxima de exposição, acima de 2,0. Infelizmente, não há um claro padrão, no qual os melhores estudos são mais ou menos prováveis, para produzir associações positivas. No agregado, assumindo quantidades de erros randômicos entre os estudos, os resultados são mais consistentes com uma associação positiva fraca, com riscos relativos para os grupos mais expostos da ordem de 1,1 a 1,3. Riscos relativos desta magnitude estão abaixo do nível em que métodos epidemiológicos podem efetivamente acessar relações causais. Apesar de tudo, a evidência entre campos eletromagnéticos ELF e leucemia em adultos é fraca”.

1.10 Tumores do sistema nervoso em adultos

As conclusões fornecidas pelos campos eletromagnéticos ELF e leucemia em adultos são essencialmente aplicáveis à literatura do câncer de cérebro. Um amplo número de estudos, muitos relacionados à exposição ocupacional, têm gerado medidas de associação variando de nenhuma à forte associação, mas no agregado, o risco relativo estimado estaria na faixa de 1,1 a 1,3, um nível no qual uma discussão significativa de causalidade não é possível [17].

1.11 Câncer de mama em adultos

A conexão entre o câncer de mama e os campos eletromagnéticos ELF também tem sido objeto de pesquisa. Abaixo são apresentadas as opiniões dos principais grupos de revisão mundiais.

1.11.1 A opinião do SCENIHR (“Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks”)

Na opinião do SCENIHR sobre campos eletromagnéticos ELF, em 2007, fica estabelecido sobre o câncer de mama, em particular, o seguinte [20]:

“O câncer de mama é de interesse particular por causa dos resultados experimentais, sugerindo que a síntese de melatonina está relacionada à exposição a campos eletromagnéticos ELF, e porque a melatonina pode estar associada ao desenvolvimento do câncer de mama. Muitos estudos também relataram um aumento no risco do câncer de mama entre sujeitos com exposição elevada a campos eletromagnéticos ELF. Entretanto, os últimos grandes e controlados estudos têm sido inteiramente negativos e a hipótese de uma conexão entre exposição a campos eletromagnéticos ELF e risco de câncer de mama é essencialmente descartada”.

1.11.2 A opinião da OMS

O critério de saúde ambiental da OMS, publicado em sua monografia de 2007, concluiu [18]:

“Subseqüentemente à monografia da IARC, um número de relatórios têm sido publicados associando o risco do câncer de mama feminino em adultos com a exposição a campos eletromagnéticos ELF. Estes estudos são mais profundos que os anteriores e menos suscetíveis a desvios, e todos são negativos. Com estes estudos, a evidência para uma associação entre a exposição a campos eletromagnéticos ELF e risco de câncer de mama feminino é consideravelmente fraca e não suporta uma associação desta espécie. No caso de câncer cerebral em adultos e leucemia, os novos estudos publicados após a monografia da IARC não mudam a conclusão de que não há uma associação entre campos eletromagnéticos

ELF e o risco a este tipo de doença. Para outras doenças e todos os outros tipos de câncer, a evidência permanece inadequada”.

1.12 Desordem neurodegenerativa

As principais desordens neurodegenerativas são a doença de Alzheimer (DA), a doença de Parkinson e a Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA), também conhecida como doença de Lou Gehrig. Abaixo são apresentadas as opiniões dos principais grupos de revisão mundiais sobre desordem neurodegenerativa e campos eletromagnéticos ELF.

1.12.1 A opinião da NRPB

Em novembro de 2001, o grupo de alerta (grupo conselheiro) da NRPB, publicou um relatório sobre campos magnéticos e doenças neurodegenerativas. A conclusão foi [15]:

“Não há nenhuma base sólida para pensar que a exposição a campos eletromagnéticos ELF pode causar doença de Parkinson e somente muito fraca evidência para sugerir que estes campos poderiam causar a doença de Alzheimer. A evidência de que pessoas empregadas no setor elétrico têm risco aumentado de desenvolver ELA é substancialmente forte, mas isso se deve primeiramente ao risco aumentado que elas têm de receberem um choque elétrico, antes mesmo da exposição prolongada a campos eletromagnéticos ELF”.

Em seu novo alerta sobre exposição a campos eletromagnéticos ELF, em 2004, a NRPB estabeleceu [15]:

“Estudos de exposição ocupacional a campos eletromagnéticos ELF não produzem forte evidência de associações com doenças neurodegenerativas. A única possível exceção está relacionada às pessoas empregadas no setor elétrico, as quais parecem ter um risco aumentado em desenvolver ELA. Entretanto, isto pode ser devido aos efeitos de choques elétricos, antes mesmo da exposição prolongada a campos eletromagnéticos ELF”.

1.12.2 A opinião da ICNIRP

A maior revisão publicada pela ICNIRP, em 2002, concluiu [17]:

“Por razões discutidas nas seções precedentes, os resultados da ELA estão envolvidos com um risco aumentado em sujeitos expostos a campos eletromagnéticos ELF. Entretanto, estudos confirmatórios são necessários, pois muitos estudos relacionam a ELA com choques elétricos e não com a exposição aos campos eletromagnéticos ELF. Para a DA ocorre igualmente, ou seja, não há suporte para a hipótese de uma conexão entre a DA e os campos eletromagnéticos ELF”.

1.12.3 A opinião do SCENIHR

Na opinião do SCENIHR, em 2007, sobre os campos eletromagnéticos ELF, ficou estabelecido [20]:

“Para muitos dos outros resultados o suporte nunca foi forte. Entretanto, muitas doenças degenerativas são ainda consideradas valiosas em termos de estudo, e isto se refere particularmente à ELA e à DA”.

1.12.4 A opinião da OMS

A monografia do critério de saúde ambiental publicada em 2007 concluiu [18]:

“Tem sido sugerido que a exposição a campos eletromagnéticos ELF está associada com muitas doenças neurodegenerativas. Para doença de Parkinson e a esclerose múltipla, o número de estudos têm sido pequeno e não há evidência para uma associação com estas doenças. Para DA e ELA, mais estudos têm sido publicados. Alguns destes relatórios sugerem que pessoas empregadas no setor elétrico podem ter risco aumentado de ELA. Até agora, nenhum mecanismo biológico foi estabelecido para explicar esta associação, embora choques elétricos possam estar relacionados. A evidência para associação entre a exposição a campos eletromagnéticos ELF e ELA é considerada inadequada. Os poucos estudos investigando a associação entre exposição a campos eletromagnéticos ELF e DA são inconsistentes. Entretanto, os estudos de alta qualidade na morbidade da DA antes da mortalidade não indica uma associação. De modo geral, a evidência para uma associação entre exposição a campos eletromagnéticos ELF e DA é inadequada”.

1.13 Esclerose múltipla

A esclerose múltipla não tem sido vista como uma outra desordem neurodegenerativa. Não há nenhum suporte que indique uma associação com campos eletromagnéticos ELF e a esclerose múltipla [17].

1.14 Doenças do coração

As possíveis conexões entre as doenças do coração e os campos eletromagnéticos ELF também têm gerado várias pesquisas. Abaixo são apresentadas as opiniões dos grupos de revisão mais importantes mundialmente.

1.14.1 A opinião da ICNIRP

A maior revisão de epidemiologia feita pela ICNIRP, publicada em 2001, concluiu [17]:

“Em suma, a evidência de efeitos cardiovasculares devido à elevada exposição a campos eletromagnéticos ELF é fraca, e se uma associação específica existe entre exposição e controle autônomo do coração alterado, permanece especulativa até que evidências de estudos epidemiológicos mais consistentes se tornem disponíveis”.

1.14.2 A opinião da NRPB

Em seu novo alerta sobre exposição a campos eletromagnéticos ELF, em 2004, a NRPB estabeleceu [15]:

“... a evidência para uma conexão entre doença cardiovascular e campos eletromagnéticos ELF é muito fraca”.

1.14.3 A opinião do SCENIHR

Em 2007, o SCENIHR emitiu sua opinião sobre os campos eletromagnéticos ELF [20]:

“Um efeito de variabilidade nas taxas de compressão e expansão do coração, visto em estudos laboratoriais, foi base para a hipótese de que a exposição a campos eletromagnéticos ELF pode afetar o risco de doença cardíaca, e alguns resultados epidemiológicos iniciais asseguravam isso. Entretanto, mais tarde, estudos bem mais controlados desmentiram esta hipótese”.

1.14.4 A opinião da OMS

A monografia do critério de saúde ambiental, publicada em 2007, concluiu [18]:

“Estudos experimentais tanto para curto período quanto para longo período de exposição indicam que, enquanto o choque elétrico é um risco de saúde óbvio, outros efeitos cardiovasculares perigosos associados com campos eletromagnéticos ELF são improváveis de ocorrer em níveis de exposição comumente encontrados ambientalmente ou ocupacionalmente. Embora muitas mudanças cardiovasculares tenham sido relatadas na literatura, a maioria dos efeitos é pequena e os resultados não têm sido consistentes com os estudos. Nenhum dos estudos de morbidade e mortalidade por doença cardiovascular tem mostrado uma associação com a exposição a campos eletromagnéticos ELF”.

1.15 Suicídio e Depressão

O suicídio e a depressão e a possível relação com campos eletromagnéticos ELF têm gerado pesquisas. Abaixo são apresentados os pareceres dos grupos de revisão mais importantes mundialmente.

1.15.1 A opinião da ICNIRP

A maior revisão de epidemiologia publicada pela ICNIRP, em 2001, concluiu [17]:

“Quando analisando toda a literatura sobre campos eletromagnéticos ELF e suicídio, é necessário considerar os pesos relativos dos estudos disponíveis juntamente com os seus resultados. Em relação a esses estudos, deve-se dar pouco peso aos estudos mais antigos por razões metodológicas. Além disso, os últimos estudos sugerem que um risco adicional pode certamente existir. A literatura sobre sintomas depressivos e campos eletromagnéticos ELF é de difícil interpretação porque os resultados não são consistentes. Esta complexidade pode não ser facilmente resolvida pela sugestão de que um tipo de resultado pode estar confinado a um grupo de estudos com problemas metodológicos ou alguma outra limitação”.

1.15.2 A opinião da NRPB

Em seu novo alerta sobre exposição a campos eletromagnéticos ELF, em 2004, a NRPB estabeleceu [15]:

“Estudos de suicídio e doenças depressivas têm gerado resultados inconsistentes em relação à exposição a campos eletromagnéticos ELF”...

1.16 Efeitos reprodutivos

Os possíveis efeitos dos campos eletromagnéticos ELF na reprodução humana também têm gerado pesquisas. As opiniões dos principais grupos de revisão são apresentadas abaixo.

1.16.1 A opinião da ICNIRP

A maior revisão de epidemiologia publicada pela ICNIRP, em 2001, concluiu [17]:

“As limitações metodológicas impossibilitam conclusões sobre resultados reprodutivos. Os estudos com medidas refinadas da exposição e do resultado podiam render resultados diferentes do que aqueles relatados à data. Entretanto, na base de considerações teóricas e de ambos os estudos experimentais e epidemiológicos, não há muito incentivo para prosseguir na pesquisa sobre campos eletromagnéticos ELF e a saúde reprodutiva. A evidência existente não dá suporte à hipótese de que a exposição maternal a campos eletromagnéticos ELF residenciais, incluindo a cama aquecida, ou a exposição no local de trabalho está associada com os resultados adversos da gravidez”.

1.16.2 A opinião da NRPB

Uma indicação do grupo consultivo da NRPB em campos eletromagnéticos ELF e em aborto espontâneo, em abril de 2002, discute dois artigos recentes em campos eletromagnéticos ELF e em aborto espontâneo, concluindo [15]:

“Nenhum estudo fornece a evidência substancial de risco aumentado de aborto espontâneo atribuído à exposição aos campos eletromagnéticos ELF acima da média e nenhum justifica uma ação regulatória. Uma investigação epidemiológica adicional que se dirija à edição de maneira robusta seria de alto custo e difícil de realizar. Na ausência de um mecanismo biológico plausível que ligue tal exposição ao aborto espontâneo, é argumentável se seria justificável realizar uma pesquisa deste tipo. Se um estudo adicional fosse requerido, valeria a pena financiar somente se um grupo grande de 2000 mulheres pudesse ser entrevistado e pudessem ser feitas as medidas de suas exposições por um período de pelo menos 24 horas, menos de 8 semanas após seu último período menstrual e teria que repetir as medidas feitas pelo menos em duas ocasiões adicionais dentro das 8 semanas seguintes, para determinar a consistência das exposições durante toda a gravidez adiantada e seu relacionamento temporal com o aborto espontâneo”.

Em seu novo alerta sobre a exposição a campos eletromagnéticos ELF, em 2004, a NRPB estabeleceu [15]:

“A evidência total dos estudos da exposição maternal aos campos eletromagnéticos ELF no local de trabalho não indica uma associação com os resultados adversos da gravidez, enquanto que estudos de exposição maternal a campos eletromagnéticos ELF residenciais são difíceis de interpretar”.

1.16.3 A opinião da OMS

A monografia do critério de saúde ambiental, publicada em 2007, concluiu [18]:

“De maneira geral, os estudos epidemiológicos não têm mostrado uma associação entre resultados reprodutivos humanos e exposições maternas e paternas a campos eletromagnéticos ELF. Há alguma evidência para um aumento do risco de aborto espontâneo associado com a exposição materna a campos eletromagnéticos ELF, mas esta evidência é inadequada. De maneira geral, a evidência para efeitos reprodutivos e de desenvolvimento é imprópria”.

1.17 Hipersensibilidade

Hipersensibilidade ou sensibilidade elétrica (SE) é a condição relatada por algumas pessoas muito sensíveis a campos elétricos e magnéticos, reagindo a níveis baixos destes campos de varias formas, tais como dores de cabeça e estresse. Abaixo são apresentadas as opiniões dos principais grupos de revisão mundiais.

1.17.1 A opinião de Rubin (G. James Rubin et al.)

Em 2005, uma revisão foi publicada. Ela concluiu que [21]:

“Os sintomas descritos como SE podem ser exagerados e muitas vezes infundados. Tem sido difícil provar que estes sintomas estão relacionados à exposição a campos eletromagnéticos ELF. Isto sugere que a SE não está relacionada à presença de campos eletromagnéticos ELF e desta forma, mais pesquisas neste fenômeno necessitam ser feitas”.

1.17.2 A opinião da HPA (“Health Protection Agency”)

Em novembro de 2005 a HPA do Reino Unido publicou um relatório sobre sensibilidade elétrica. Este trabalho foi liderado pelo Dr. Neil Irvine, com a autorização da HPA, em resposta aos críticos que disseram que em 2004 esta agência não deu o devido peso à SE. O relatório concentra-se em campos eletromagnéticos ELF.

O relatório é moldado especificamente como não sendo centrado na etiologia (aquilo que causa os sintomas), mas preferivelmente como sendo sobre a compreensão e a descrição dos sintomas. Sobre a etiologia, o relatório, entretanto, anota [22]:

“... uma revisão recente (NRPB 2004) não encontrou nenhuma evidência causal compelindo para efeitos de saúde”...

“... o uso do termo SE nesta revisão, não implica na aceitação de um relacionamento causal entre sintomas e a exposição atribuída, entretanto”.

“Enquanto os experimentadores e seus grupos de sustentação estão firmemente convencidos de uma relação causal com os campos eletromagnéticos ELF, a maioria das opiniões científicas não considera que haja uma evidência robusta de tal relação. Esta posição é sustentada por uma revisão recente e sistemática de 31 estudos”...

O relatório revê completamente a literatura existente sobre SE. Muito desta literatura vem dos países nórdicos e da Suécia, em particular.

Com relação ao tratamento, o relatório é cauteloso sobre os métodos adotados pelos experimentadores e seus grupos de sustentação, mas sugere “algum sucesso” em estratégias de gerenciamento baseadas na psicologia, e sugere o sucesso relatado por outras estratégias como oferecer um ambiente cauteloso (campos fracos), ao invés de um tratamento específico.

1.17.3 A opinião da OMS

Em 2005, a OMS publicou um relatório sobre a SE. As conclusões são as que seguem abaixo [18]:

“A SE é caracterizada por uma variedade de sintomas não específicos e varia de indivíduo para indivíduo. Os sintomas são certamente reais e podem variar

amplamente nos níveis de severidade. Qualquer que seja a sua causa, a SE pode ser um problema incapacitante para o indivíduo afetado. A SE não possui um critério de diagnóstico claro e não há base científica para ligá-la à exposição aos campos eletromagnéticos ELF. Além do mais, a SE não é um diagnóstico médico, e nem está claro que ela represente um problema médico único”.

1.17.4 A opinião do SCENIHR

Em 2007, em relação aos campos magnéticos ELF, o SCENIHR estabeleceu [20]:

“Uma variedade de sintomas (sintomas dermatológicos tais como vermelhidão, coceira e queimação, além de sintomas neurovegetativos como fadiga, dor de cabeça, dificuldades de concentração, náusea, palpitação do coração) tem sido sugeridos como sendo causados pela exposição a campos eletromagnéticos ELF. O termo SE tem sido comumente usado, baseado na experiência relatada por indivíduos que se dizem afetados por campos elétricos e magnéticos ELF, produzidos na proximidade de aparelhos eletrodomésticos em funcionamento. Uma relação entre exposição a campos eletromagnéticos ELF e sintomas não tem sido mostrada em estudos científicos. Destes resultados, parece claro que os campos eletromagnéticos ELF não constituem fator suficiente ou necessário que cause a SE relatada pelos indivíduos que se dizem afetados”.

1.18 Exposição dos pais afetando os filhos

Os possíveis efeitos dos campos eletromagnéticos ELF sobre a fertilidade masculina, nascimento e câncer infantil têm gerado pesquisas. A opinião de um importante grupo de revisão é relatada abaixo.

1.18.1 A opinião da NRPB

Em seu novo alerta sobre exposição a campos eletromagnéticos ELF, em 2004, a NRPB estabeleceu [15]:

“Resultados de estudos sobre fertilidade masculina, nascimento e câncer infantil em relação à exposição ocupacional dos pais aos campos eletromagnéticos ELF têm sido inconsistentes e não convincentes”.

1.19 Efeitos em animais e plantas

Além dos possíveis efeitos em seres humanos, possíveis efeitos de campos eletromagnéticos ELF em vários animais (por exemplo, vacas, ovelhas, porcos e cavalos) têm sido estudados ao longo dos tempos. Nenhum efeito detectável dos campos eletromagnéticos ELF tem sido encontrado, como por exemplo, saúde, produção de leite, comportamento e qualidade da carcaça (ossos) [23].

Muitas das pesquisas em campos eletromagnéticos ELF, flora e fauna, foram conduzidas nas décadas de 70 e 80. Desde então, pequena pesquisa neste assunto tem sido realizada, refletindo que os campos eletromagnéticos ELF não têm mostrado nenhum efeito detectável (com as exceções específicas das abelhas produtoras de mel, nas colméias e árvores crescendo perto de LTs sujeitas ao efeito corona) [23].

A evidência foi mostrada pelo Dr. Harry Gibbs, que conduziu uma pesquisa sobre as necessidades da comunidade e o desenvolvimento das LTs de alta tensão no estado de New South Wales (Reino Unido), em 1990 e 1991. O capítulo 6 deste relatório estabelece um acordo com animais e plantas. Suas conclusões estão contidas na seção 6.6 [23]:

- (i) Abelhas em colméias sob ou perto de LTs são adversamente afetadas por choques elétricos criados por correntes induzidas pelas LTs, mas o efeito pode ser diminuído através de uma blindagem.
- (ii) Os campos magnéticos criados pelas LTs não afetam a saúde ou a capacidade reprodutiva de animais domésticos ou representam um perigo para a fauna nativa.
- (iii) O crescimento de árvores que estão perto de uma LT pode ser reduzido pelo efeito corona. Em qualquer caso, a altura das árvores perto de LTs poderá ser restringida quando for necessário e interessante para a segurança. Qualquer perda resultante disso proporciona ao proprietário da terra, uma compensação de pagamento pela aquisição do estabelecimento. Isto é discutido no capítulo 16 deste relatório.
- (iv) De um ponto de vista prático, os campos elétricos criados pelas LTs não têm nenhum efeito adverso nas colheitas, pastagens ou flora nativa, tais como árvores crescendo sob ou perto das LTs.

1.20 Análise das regulamentações nacionais e internacionais

1.20.1 Introdução

Diversas organizações nacionais e internacionais assim como inúmeros países têm emitido regulamentações estabelecendo limites para a exposição de pessoas a campos elétricos e magnéticos, tanto para condições ambientais quanto para condições ocupacionais.

No Brasil existem duas publicações de caráter normativo que tratam deste assunto. A Norma NBR 5422 (Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica) publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em 1985. Esta norma estabelece apenas limite de campo elétrico de 60 Hz para linhas de alta tensão (acima de 69 KV). Não é estabelecido limite de campo magnético [24].

A ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), em 2002, publicou a Resolução 303 (Regulamento sobre limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz). Foram adotados os limites estabelecidos pela ICNIRP [24].

Além destas duas publicações, a Norma Regulamentadora de Segurança e Saúde no Trabalho (NR 9 – Programa de prevenção de riscos ambientais, do Ministério do Trabalho e Emprego) recomenda os valores limite (ocupacionais) de indução magnética e campo elétrico adotados pela ACGIH [24].

A crescente preocupação da população quanto a eventuais efeitos prejudiciais destes campos à saúde humana, aliada à falta de uma diretriz brasileira para limites de exposição do público em geral a campos magnéticos de 60 Hz; tem trazido inúmeras dificuldades às empresas concessionárias de transmissão e distribuição de energia elétrica para a reforma e ampliação de seus sistemas elétricos.

1.20.2 O princípio da precaução

A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em 1992, adotou em sua declaração de princípios, o denominado “Princípio da Precaução”, redigido da seguinte forma no item 15 do texto [24]:

“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”.

No Artigo 174 do Tratado da União Européia, assinado em Maastricht, em 7 de fevereiro de 1992, o “Princípio da Precaução” foi formulado como [24]:

“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”.

Uma variante do “Princípio da Precaução” que tem sido adotada em alguns países é a “Prudent Avoidance” ou “Prevenção Prudente”. Ele pode ser descrito como a adoção de medidas preventivas de baixo custo que podem ser tomadas para reduzir a exposição do público a campos elétricos e magnéticos. O termo “prudente” da expressão “Prevenção Prudente” refere-se aos gastos mínimos realizados nas medidas tomadas para se fazer a redução da exposição individual ou da população, mesmo na ausência da certeza de que estas medidas estarão efetivamente reduzindo o risco [24].

1.20.3 Regulamentações de organizações internacionais

Neste item, são apresentadas as normas publicadas e em elaboração pelas principais organizações normativas internacionais. Destacam-se neste grupo, as diretrizes emitidas pela ICNIRP, que embora não possam ser consideradas como normas técnicas, como é o caso das publicações da IEC (“International Electrotechnical Commission”) e IEEE (“Institute of Electrical and Electronics Engineers”), foram elaboradas por uma comissão internacional de especialistas e pesquisadores de diversas áreas do conhecimento humano, após uma meticolosa análise dos estudos e pesquisas que vêm sendo desenvolvidos sobre a

exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos ao longo de mais de duas décadas em todo o mundo.

1.20.3.1 CENELEC

O CENELEC (“Comité Européen de Normalisation Electrotechnique”) é o Comitê Europeu para Normalização Eletrotécnica. Publicou em 1995, a “Pre-standard” ENV 50166-1, “Human exposure to electromagnetic fields – low-frequency (0 Hz a 10 kHz)”, que estabelece limites de exposição com base em efeitos de curta duração, correlacionando a densidade de corrente induzida pelos campos no corpo humano, e seus efeitos em função do sistema nervoso [24].

Os valores limites de acordo com a ENV 50166-1 são os apresentados na Tabela 1.2 [24].

Tabela 1.2. Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.

Valores Limite para 60 Hz	E (kV/m)	B (μ T)
Ocupacional	25 *	1333
Público em Geral	8,33	533
* com restrição de tempo de exposição		

1.20.3.2 IEC

A IEC (“International Electrotechnical Commission”) é a Comissão Eletrotécnica Internacional. Através do Comitê Técnico TC 106 (“Metodologia para avaliação de campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos associados à exposição humana”); tem como objetivo preparar normas sobre a metodologia de medição e cálculo para avaliação da exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de frequência de 0 Hz a 300 GHz. Este comitê não tem por finalidade estabelecer limites de exposição e métodos de mitigação de campos. Este comitê não publicou até o momento nenhuma norma e é constituído por Grupos de Trabalho (“Working Groups”) e Times de Projeto (“Project Teams”) [24].

Em baixas frequências atuam os Grupos de Trabalho WG 1 e WG 2, e os Times de Projeto PT 62226, PT 62233 e PT 62311 [24].

1.20.3.3 IEEE

O IEEE (“Institute of Electrical and Electronics Engineers”) é o Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos.

Em 1999, o IEEE publicou a norma Std C95.1 (“IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields (3 kHz to 300 GHz)”) estabelecendo limites de segurança para exposição humana a campos eletromagnéticos em radio frequência, de 3 kHz a 300 GHz [24].

Para campos elétricos e magnéticos de baixa frequência (0 a 3 kHz) foi criado um grupo de estudo para elaborar projeto de norma, cujos trabalhos continuam em andamento.

Este projeto tem por título “Standard for maximum levels of human exposure to electromagnetic fields (0 to 3 kHz)”, e será baseado nos resultados de avaliação da literatura científica relevante, e efeitos comprovados que estão bem estabelecidos e para os quais, os limiares de reação estão compreendidos. Os limites de campos serão obtidos dos limites de densidade de corrente ou campos elétricos internos. Esta norma complementar a C95.1 [24].

1.20.3.4 ACGIH

A ACGIH (“American Conference of Governmental Industrial Hygienists”) é a Conferência de Higienistas Industriais do Governo Americano.

A ACGIH publica os valores de exposição em situações ocupacionais para campos elétricos e magnéticos em 50/60 Hz, que são reconhecidos e adotados pelos países associados, dentre eles o Brasil, através do Ministério do Trabalho e Emprego.

Os valores limite recomendados pela ACGIH para exposição ocupacional, para campos de 60 Hz, são de 25 kV/m para o campo elétrico e 1000 μ T para densidade de fluxo magnético, conforme resumido na Tabela 1.3 [24].

Tabela 1.3. Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.

Valores Limite para 60 Hz	E (kV/m)	B (μ T)
Ocupacional	25	1000
Público em Geral	-	-

1.20.3.5 ICNIRP

A ICNIRP (“International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection”) é a Comissão Internacional de Proteção à Radiação Não Ionizante.

Em 1998, a ICNIRP revisou estudos anteriores e publicou seu “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)”, que são diretrizes que estabelecem limites para a exposição humana a campos elétricos e magnéticos para frequência de 0 Hz até 300 GHz. Estas diretrizes foram estabelecidas tomando como base uma detalhada revisão de toda literatura científica publicada sobre efeitos biológicos provocados pela exposição de seres vivos, não apenas humanos, a campos elétricos e magnéticos, incluindo efeitos térmicos e não térmicos. Os limites de campo elétrico e indução magnética estão apresentados nas Tabelas 1.4 e 1.5, para as frequências de 50 e 60 Hz [24].

Tabela 1.4. Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.

Valores Limite para 50 Hz	E (kV/m)	B (μ T)
Ocupacional	10	500
Público em Geral	5	100

Tabela 1.5. Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.

Valores Limite para 60 Hz	E (kV/m)	B (μ T)
Ocupacional	8,33	417
Público em Geral	4,17	83,3

1.20.4 Regulamentação brasileira

A regulamentação brasileira segue os valores limite de campo elétrico e indução magnética recomendados pela ACGIH. Não há a definição de valor limite para a indução magnética para o público em geral. A Tabela 1.6 mostra os valores limite de campo elétrico e indução magnética regulamentados no Brasil [24].

Tabela 1.6. Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.

Valores Limite para 60 Hz	E (kV/m)	B (μ T)
Ocupacional	25	1000
Público em Geral	5 *	-

* Valor estabelecido no limite de faixas de segurança de linhas de transmissão.

1.20.5 Conclusão sobre as regulamentações nacionais e internacionais

Na tabela abaixo estão sumarizados os limites de campos elétrico e magnético considerando a exposição humana, empregados nos diversos países, e os normalizados por organizações internacionais [24].

Tabela 1.7. Valores limite de campo elétrico e de indução magnética.

País / Organização	E (kV/m)		B (μ T)	
	Ocupacional	Público	Ocupacional	Público
Alemanha ⁽¹⁾	-	5 ⁽⁴⁾	-	100 ⁽⁴⁾
França ⁽¹⁾	-	5 ⁽⁴⁾	-	100 ⁽⁴⁾
Reino Unido ⁽²⁾	10	10	1333	1333
Itália ⁽¹⁾	-	5 e 10 ⁽³⁾	-	100 e 1000 ⁽³⁾
Suécia	-	-	-	-
Suíça ⁽¹⁾	-	5 ⁽⁴⁾	-	1 e 100 ⁽⁴⁾
Canadá ⁽²⁾	8,33 ⁽⁴⁾	4,17 ⁽⁴⁾	417 ⁽⁴⁾	83 ⁽⁴⁾
Florida – EUA ⁽²⁾	-	2 - 8 e 10	-	15, 20 e 25
Minnesota-EUA ⁽²⁾	-	8	-	-
Montana-EUA ⁽²⁾	-	7 e 1	-	-

New Jersey-EUA ⁽²⁾	-	3	-	-
New York-EUA ⁽²⁾	-	11,8-11-7- 1,6	-	20
Oregon – EUA ⁽²⁾	-	9	-	-
Japão	3	3	-	-
Rússia	25	-	1.000	-
Coréia do Sul ⁽²⁾	8,33 ⁽⁴⁾	4,17 ⁽⁴⁾	417 ⁽⁴⁾	83 ⁽⁴⁾
África do Sul ⁽²⁾	8,33 ⁽⁴⁾	4,17 ⁽⁴⁾	417 ⁽⁴⁾	83 ⁽⁴⁾
Austrália ⁽²⁾	10 ⁽³⁾	5 ⁽³⁾	500 ⁽³⁾	100 ⁽³⁾
Brasil ⁽²⁾	25	5 ⁽³⁾	1.000	-
CENELEC ⁽²⁾	25	8,33	1333	533
IEC	-	-	-	-
IEEE	-	-	-	-
ACGIH ⁽²⁾	25	-	1.000	-
ICNIRP ⁽²⁾	8,33	4,17	417	83,33
⁽¹⁾ Campos de 50 Hz. ⁽²⁾ Campos de 60 Hz. ⁽³⁾ Regulamentação em revisão. ⁽⁴⁾ Adota recomendações da ICNIRP.				

Pode-se observar que os limites de campo elétrico para exposição ocupacional estão na faixa entre 3 e 25 kV/m, e para o público em geral entre 1 e 11,8 kV/m. Para a densidade de fluxo magnético os limites variam entre 417 e 1333 μ T para exposição ocupacional, e entre 1 e 1000 μ T para o público em geral.

Pode-se observar também que a maioria dos países desenvolvidos segue as recomendações da ICNIRP: 4 dos 6 países europeus analisados, 1 dos 2 países norte-americanos, e 1 dos 3 países asiáticos. A ICNIRP é a organização que apresenta os valores mais conservativos e com os maiores fatores de segurança, dentre as que emitiram diretrizes baseadas em evidências científicas. Os limites da ICNIRP são reconhecidos oficialmente pela Organização Mundial da Saúde (OMS) [24].

Recomenda-se que os limites a serem adotados pelas empresas do setor elétrico brasileiro sejam os limites da ICNIRP para exposições do público em geral e para exposições ocupacionais os limites da ACGIH [24].

1.21 Conclusão

Muitos rumores existem sobre a conexão existente entre câncer e outras doenças e os campos eletromagnéticos ELF. Como foi visto em seções anteriores, não existe absolutamente nada de comprovado com relação a esta conexão em termos científicos. Pode-se afirmar que há uma grande preocupação de entidades governamentais, não governamentais e concessionárias de energia elétrica, com relação aos possíveis efeitos de campos eletromagnéticos ELF sobre a saúde humana, tratando-se de uma questão de saúde pública. Cabe ainda salientar que as concessionárias de energia elétrica têm procurado se adequar às normas regulamentadoras estabelecidas pelas organizações responsáveis, praticando desta forma o “Princípio da Precaução”.

Capítulo 2 Campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão

2.1 Introdução

Os campos eletromagnéticos ELF (“Extremely Low Frequency”) gerados por linhas de transmissão (LTs) de potência têm sido amplamente investigados pela comunidade científica devido à preocupação existente por parte de órgãos governamentais, não governamentais e concessionárias de energia elétrica relativa aos seus possíveis efeitos em seres vivos.

O objetivo deste capítulo é discorrer sobre o campo elétrico e o campo magnético gerado por LTs de potência. Serão estudados estes dois campos e algumas maneiras de calculá-los. Embora o objetivo deste trabalho foque os campos magnéticos, será dada também ao leitor uma visão geral sobre campos elétricos.

Na literatura é possível encontrar vários métodos para o cálculo de campos elétricos. Entre os métodos numéricos citam-se [25]: diferenças finitas, elementos finitos, cargas equivalentes e equação integral, entre outros. Observa-se também que o método das cargas equivalentes é o mais frequentemente usado. Neste capítulo serão descritas as características do campo elétrico gerado por LTs de potência bem como o seu cálculo através do método das cargas equivalentes.

Com relação ao campo magnético, é estudado e implementado o cálculo analítico, tendo como base a equação para o cálculo da indução magnética gerada por um condutor retilíneo e infinito, obtida a partir da Lei de Ampère.

2.2 Características do campo elétrico gerado por LTs de potência

Para cada tipo de transmissão, em corrente contínua (DC) ou alternada (monofásica, trifásica e outras), o campo elétrico possui diferentes características. Para uma linha DC, o vetor campo elétrico é constante em cada posição no espaço [25]. Para uma linha monofásica com tensão alternada, o vetor campo elétrico em um ponto altera sua direção conforme a tensão da linha é alterada. Para uma linha trifásica, o vetor campo elétrico apresenta uma rotação em praticamente todo espaço, exceto nas superfícies onde se aplicam as condições de contorno (p. ex., no solo). Como a tensão é senoidal e pode ser representada por um fasor (número complexo), o campo resultante se desdobra em duas partes, sendo uma a parte real e a outra a parte imaginária, com componentes no eixo horizontal (x) e no eixo vertical (y). As componentes no eixo x , referentes a cada uma das fases, ao se somarem, geralmente se cancelam e representam menos de 10% do valor da componente no eixo y [25]. O campo elétrico é mais difícil de descrever quando é um fasor, pois são necessários quatro parâmetros para descrever os dois fasores dimensionais. O campo elétrico pode ser escrito de três modos equivalentes:

(i) O campo elétrico tem componentes nas direções espaciais vertical e horizontal e, em cada direção, uma parte real e outra imaginária (ou uma magnitude e fase), tal como:

$$\vec{E} = (E_{xr} + j E_{xi}) \vec{i} + (E_{yr} + j E_{yi}) \vec{j}; \quad (2.1)$$

(ii) O campo elétrico tem uma parte real com componentes horizontal e vertical e uma parte imaginária escrita da mesma maneira, tal como:

$$\dot{E} = (E_{xr} \vec{i} + E_{yr} \vec{j}) + j (E_{xi} \vec{i} + E_{yi} \vec{j}); \quad (2.2)$$

onde:

E_{xr} – Parcela real da componente horizontal, em x , do campo elétrico [V/m];

E_{xi} – Parcela imaginária da componente horizontal, em x , do campo elétrico [V/m];

E_{yr} – Parcela real da componente vertical, em y , do campo elétrico [V/m];

E_{yi} – Parcela imaginária da componente vertical, em y , do campo elétrico [V/m].

(iii) Uma descrição usual, apesar de não completa, é a do vetor campo elétrico como uma elipse, a qual é definida pela magnitude de seu eixo maior e ângulo direcional, e a magnitude do eixo menor.

O mais prático é descrever o campo elétrico próximo ao solo do mesmo modo como ele seria medido. Geralmente o campo é medido como a intensidade da componente vertical, que é a projeção do vetor campo elétrico sobre o eixo vertical da elipse.

2.3 Cálculo do campo elétrico gerado por LTs através do método das cargas equivalentes

No método das cargas equivalentes para uma LT, o potencial elétrico complexo instantâneo de cada fase é convertido em cargas elétricas fictícias equivalentes para a respectiva fase. As cargas são obtidas através da multiplicação da matriz de capacitâncias próprias e mútuas das fases da LT e cabos pára-raios pela matriz de potenciais. Estas cargas representam as cargas de um condutor cilíndrico de comprimento infinito que gera o mesmo campo que os cabos reais. Com as cargas calculadas, o campo elétrico é obtido pela Lei de Gauss aplicada a um cilindro de comprimento infinito.

O método de cálculo do campo elétrico gerado por LTs através das cargas equivalentes [9] consiste basicamente de duas etapas:

- (i) Cálculo da carga equivalente por unidade de comprimento do condutor;
- (ii) Cálculo do campo elétrico produzido por estas cargas.

Para o caso do cálculo do campo elétrico em duas dimensões, algumas simplificações são necessárias:

- (i) As cargas são uniformemente distribuídas em um cabo (isto implica em admitir cabos homogêneos, de superfície lisa, comprimento infinito e sem influência de objetos próximos);
- (ii) A superfície do solo é plana e equipotencial (potencial nulo);
- (iii) As torres não distorcem o campo elétrico.

2.3.1 Determinação das cargas equivalentes do condutor

Para que as cargas equivalentes sejam determinadas, algumas considerações devem ser feitas. Os potenciais entre as fases e a terra podem ser representados como cargas equivalentes distribuídas uniformemente nos condutores das fases. Para converter os potenciais em cargas, deve-se aplicar o método das cargas equivalentes [9] para calcular as capacitâncias próprias e mútuas da linha.

A fig. 2.1 ilustra um sistema de cargas equivalentes. O solo é um condutor elétrico ideal, ou seja, tem condutividade elétrica infinita ($\sigma = \infty$). Os condutores de transmissão aérea se encontram a uma altura h do solo e isolados deste. Suas cargas elétricas são influenciadas pela proximidade do solo. Se o condutor possui uma carga q , há no solo uma carga $-q$ distribuída. A carga $-q$, no solo, pode ser concentrada num condutor cilíndrico a uma altura $-h$ da superfície do solo. Este condutor é uma imagem especular do condutor aéreo em relação ao solo.

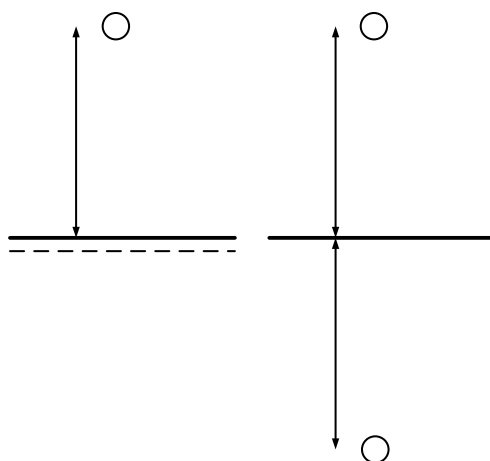


Figura 2.1. Sistema de cargas equivalentes.

- (a) Carga $-q$ distribuída na superfície do solo terrestre.
 (b) Carga $-q$ concentrada a uma altura $-h$ em relação à superfície.

Com os condutores das fases e suas imagens, é possível calcular as capacitâncias próprias e mútuas da linha. Para isto, é necessário calcular os coeficientes de potencial, reuni-los matricialmente e depois inverter esta matriz.

A seguir será apresentada a formulação matemática para o cálculo das cargas equivalentes de cada condutor das fases e cabos pára-raios.

As cargas do condutor de uma linha com múltiplos condutores podem ser representadas pela seguinte equação matricial:

$$[\dot{Q}] = [C][\dot{V}]; \quad \mathbf{h} \quad (2.3)$$

onde:

$-q$

$$[\dot{Q}] = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \cdot \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} - \text{Matriz (ou vetor coluna) de cargas complexas [C/m];}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdot & C_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & \cdot & C_{nn} \end{bmatrix} - \text{Matriz quadrada de coeficientes próprios e mútuos das capacitâncias da linha – coeficientes de potencial [F/m];}$$

$$[\dot{V}] = \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \cdot \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} - \text{Matriz das tensões complexas, composta pelas tensões nos condutores [V];}$$

onde:

n – número de fases somado ao número de cabos pára-raios.

Para determinar a matriz $[C]$, são inicialmente calculados os coeficientes de potencial da linha pelas expressões abaixo:

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i}; \quad (2.4)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}; \quad (2.5)$$

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ji}; \quad (2.6)$$

onde:

λ_{ii} – Coeficiente de potencial próprio relativo ao potencial do condutor i gerado por sua carga [m/F];

λ_{ij} – Coeficiente de potencial mútuo relativo ao potencial no condutor i gerado pelo condutor j [m/F];

h_i – Altura do condutor [m];

D'_{ij} – Distância entre o condutor i e a imagem do condutor j [m];

D_{ij} – Distância entre o condutor i e o condutor j [m];

r_i – Raio do condutor i [m].

$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ [F/m] (permissividade elétrica do vácuo).

A fig. 2.2 ilustra as grandezas necessárias para o cálculo dos coeficientes de potencial próprios e mútuos.

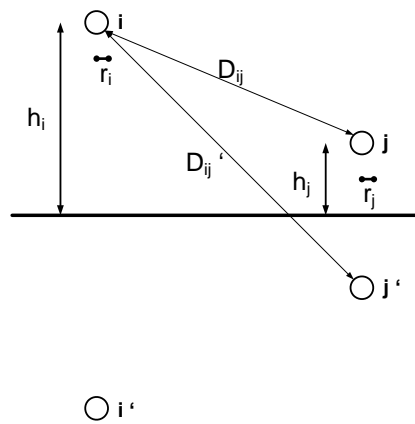


Figura 2.2. Diagrama para o cálculo dos coeficientes de potencial.

Invertendo a matriz $[\lambda]$, obtém-se a matriz $[C]$ conforme a expressão abaixo:

$$[C] = [\lambda]^{-1}; \quad (2.7)$$

e finalmente, para se calcular as cargas, utiliza-se a equação (2.3).

Quando as fases de uma LT possuem condutores com múltiplos subcondutores dispostos uniformemente sobre um círculo de raio R , como visto na fig. 2.3 (com um condutor com quatro subcondutores), um condutor equivalente pode ser adotado (com raio r_{eq} [9]). O r_{eq} pode ser interpretado como o raio de um condutor cilíndrico fictício que, possuindo a mesma carga q , produz o mesmo campo elétrico que o condutor múltiplo.

$$r_{eq} = \sqrt[m]{mrR^{m-1}}; \quad (2.8)$$

onde:

- m - número de subcondutores;
- r - raio de um subcondutor;
- R - raio geométrico do feixe.

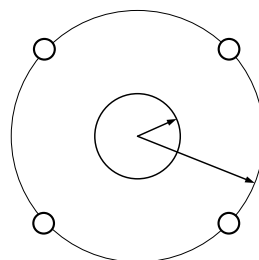


Figura 2.3. Raio equivalente de um feixe geminado.

Com as cargas equivalentes em cada um dos condutores, é possível calcular o campo elétrico utilizando a expressão para calcular o campo elétrico em um condutor de comprimento infinito [26].

2.3.2 Cálculo do campo elétrico produzido pelas cargas equivalentes

Quando as cargas por unidade de comprimento são determinadas, a intensidade do campo elétrico é calculada pela aplicação da Lei de Gauss num cilindro de comprimento infinito [26]. O campo resultante é o somatório das contribuições de cada condutor e de sua imagem.

As coordenadas do condutor a são (x_a, y_a) . As coordenadas do condutor imagem a' são $(x_a, -y_a)$, conforme a fig. 2.4, em que é mostrado apenas um condutor.

As componentes fasoriais horizontal (\dot{E}_{xa}) e vertical (\dot{E}_{ya}) da intensidade do campo elétrico em (x, y) , geradas pelo condutor a e sua imagem a' , são expressas por:

$$\dot{E}_{xa} = \frac{\dot{q}_a}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{x - x_a}{(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2} - \frac{x - x_a}{(x - x_a)^2 + (y + y_a)^2} \right] \quad (2.9)$$

e

$$\dot{E}_{ya} = \frac{\dot{q}_a}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{y - y_a}{(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2} - \frac{y + y_a}{(x - x_a)^2 + (y + y_a)^2} \right]. \quad (2.10)$$

Para n condutores, o campo elétrico será o somatório das contribuições de todos os condutores das fases e cabos pára-raios, se estes forem multiplamente aterrados. Desta forma, tem-se:

$$\dot{E}_{xt} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \left[\frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \quad (2.11)$$

e

$$\dot{E}_{yt} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \left[\frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{y + y_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right]. \quad (2.12)$$

O campo elétrico resultante é então:

$$E = \sqrt{|\dot{E}_{xt}|^2 + |\dot{E}_{yt}|^2}. \quad (2.13)$$

Este valor corresponde à magnitude do campo elétrico no ponto considerado. Trata-se de um valor eficaz (constante ao longo do tempo [9]), pois as tensões das fases são dadas em valores eficazes.

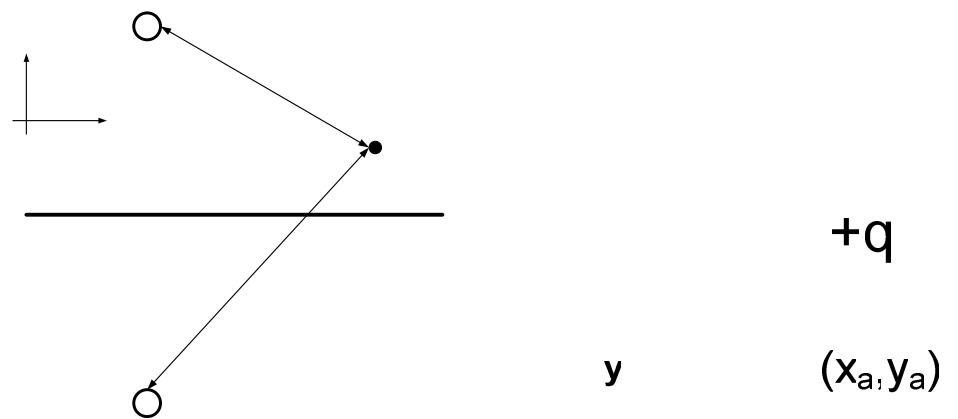


Figura 2.4. Disposição geométrica do condutor.

Para exemplificação do método, será apresentado o cálculo de uma linha fictícia com duas tensões de alimentação.

2.3.3 Exemplo de cálculo de campo elétrico gerado por uma LT bifásica através das cargas equivalentes

Considere-se uma linha bifásica, sem cabos pára-raios. Cada fase é um arranjo geminado com quatro subcondutores, distanciados entre si de 40 cm e com raio de 1,5 cm, como mostra a fig. 2.5. A distância horizontal entre as fases é de 5 m. A altura média dos subcondutores da fase *A* é de 15 m e da fase *B*, 20 m. Será calculado o campo elétrico resultante no ponto *P* (20 ; 2) no referencial *Oxy*, considerando-se a origem $(x_a, -y_a)$ coordenadas no solo, sob a fase *A*.

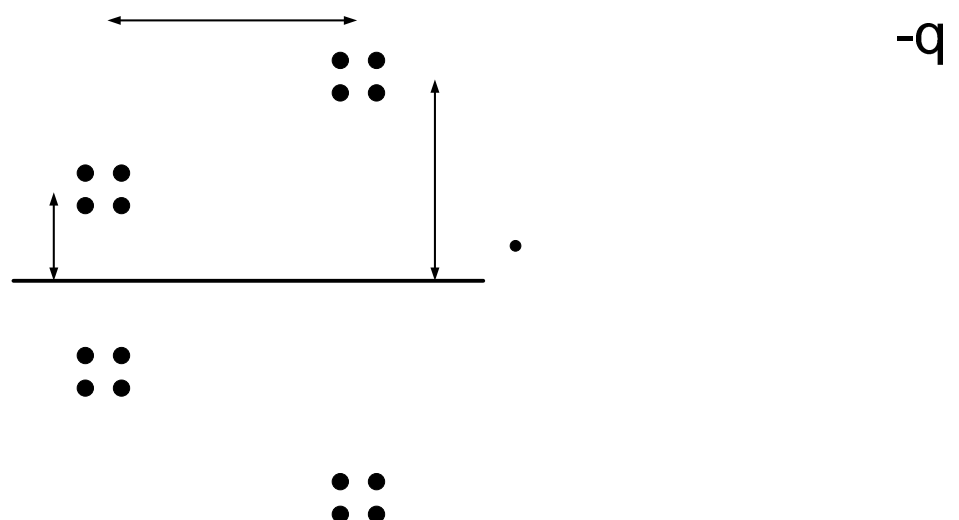


Figura 2.5. Disposição geométrica de uma LT com duas tensões de alimentação consideradas.

Com relação à fig. 2.5, *A* e *A'* são, respectivamente, os condutores da fase e sua imagem. O mesmo vale para a fase *B*.

Inicialmente calcula-se o raio equivalente do arranjo geminado, de acordo com a equação (2.8). Substituindo seus valores, tem-se:

$$r_{eq} = \sqrt[4]{4 \times 0,015 \times \left(0,4 \times \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^3} = 0,1920 \text{ m}.$$

Com as equações (2.4), (2.5) e (2.6), calculam-se os potenciais próprios e mútuos:

$$\lambda_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2 \times 15}{0,1920} = \frac{5,0515}{2\pi\epsilon_0};$$

$$\lambda_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2 \times 20}{0,1920} = \frac{5,3391}{2\pi\epsilon_0};$$

$$\lambda_{12} = \lambda_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{35,3553}{7,0711} = \frac{1,6094}{2\pi\epsilon_0}.$$

A matriz de capacitâncias (próprias e mútuas) será:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 5,0515 & 1,6094 \\ 1,6094 & 5,3391 \end{bmatrix}^{-1};$$

$$C = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 0,2190 & -0,0660 \\ -0,0660 & 0,2072 \end{bmatrix}.$$

Considerando-se as tensões como:

$$\dot{V}_a = V_{m\acute{a}x} [\cos(\omega t) + j \text{sen}(\omega t)];$$

$$\dot{V}_b = V_{m\acute{a}x} \left[\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + j \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right].$$

Para $V_{m\acute{a}x} = 500 \text{ kV}$ e $\omega t = 0$:

$$\dot{V}_a = 500 \angle 0^0 \text{ kV} = (500 + j0) \text{ kV};$$

$$\dot{V}_b = 500 \angle 120^0 \text{ kV} = (-250 + j433,013) \text{ kV}.$$

Assim, a matriz de cargas será:

$$\dot{Q} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 0,2190 & -0,0660 \\ -0,0660 & 0,2072 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 500 \times 10^3 \\ (-250 + j433,013) \times 10^3 \end{bmatrix}.$$

Desta forma, tem-se:

$$\dot{q}_a = 2\pi\epsilon_0(1,260 \times 10^5 - j 2,858 \times 10^4) \text{ C};$$

$$\dot{q}_b = 2\pi\epsilon_0(-8,481 \times 10^4 + j 8,972 \times 10^4) \text{ C}.$$

Aplicando estas cargas nas equações (2.9) e (2.10), tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{xa} &= \frac{2\pi\epsilon_0(1,260 \times 10^5 - j 2,858 \times 10^4)}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{20-0}{(20-0)^2 + (2-15)^2} - \frac{20-0}{(20-0)^2 + (2+15)^2} \right]; \\ &= 771 - j 175 \text{ [V / m]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{ya} &= \frac{2\pi\epsilon_0(1,260 \times 10^5 - j 2,858 \times 10^4)}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{2-15}{(20-0)^2 + (2-15)^2} - \frac{2+15}{(20-0)^2 + (2+15)^2} \right]; \\ &= -5988 + j 1358 \text{ [V / m]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{xb} &= \frac{2\pi\epsilon_0(-8,481 \times 10^4 + j 8,972 \times 10^4)}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{20-5}{(20-5)^2 + (2-20)^2} - \frac{20-5}{(20-5)^2 + (2+20)^2} \right]; \\ &= -523 + j 553 \text{ [V / m]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{yb} &= \frac{2\pi\epsilon_0 \times (-8,481 \times 10^4 + j 8,972 \times 10^4)}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{2-20}{(20-5)^2 + (2-20)^2} - \frac{2+20}{(20-5)^2 + (2+20)^2} \right]. \\ &= 5412 - j 5726 \text{ [V / m]} \end{aligned}$$

Aplicando as equações (2.11) e (2.12), tem-se:

$$\dot{E}_{xt} = \dot{E}_{xa} + \dot{E}_{xb} = 248 + j 378 \text{ [V / m]};$$

$$\dot{E}_{yt} = \dot{E}_{ya} + \dot{E}_{yb} = -575 - j 4368 \text{ [V / m]}.$$

O campo elétrico total será obtido a partir da equação (2.13):

$$E = \sqrt{248^2 + 378^2 + 575^2 + 4368^2} \cong 4430 \text{ [V / m]}.$$

Este é o valor do campo elétrico para a tensão de alimentação considerada num determinado instante de tempo, o qual não corresponde necessariamente ao valor máximo de campo. O campo resultante, para este caso de linha, variará conforme a variação de ωt . A linha teria que ser trifásica balanceada para que o campo elétrico resultante fosse máximo.

2.4 Características do campo magnético gerado por LTs de potência

Assim como o campo elétrico, o campo magnético gerado por LTs de potência pode ser escrito conforme abaixo:

$$\dot{B} = (B_{xr} + j B_{xi}) \vec{i} + (B_{yr} + j B_{yi}) \vec{j}; \quad (2.14)$$

$$\dot{B} = (B_{xr} \vec{i} + B_{yr} \vec{j}) + j (B_{xi} \vec{i} + B_{yi} \vec{j}); \quad (2.15)$$

onde:

B_{xr} – Parcela real da componente horizontal, em x , do campo magnético [T];

B_{xi} – Parcela imaginária da componente horizontal, em x , do campo magnético [T];

B_{yr} – Parcela real da componente vertical, em y , do campo magnético [T];

B_{yi} – Parcela imaginária da componente vertical, em y , do campo magnético [T].

2.5 Cálculo analítico do campo magnético gerado por LTs de potência

Nesta seção será apresentado o cálculo analítico de campos magnéticos gerados por LTs de potência. Inicialmente é determinada a equação para o cálculo da indução magnética gerada por um condutor retilíneo e infinito [26], e posteriormente são determinadas as equações para o cálculo da indução magnética gerada pela LT propriamente dita. No final desta seção, há vários exemplos de cálculo de indução magnética para as configurações mais usuais de LTs de potência.

2.5.1 Cálculo do campo magnético gerado por um fio condutor infinito

A equação de Maxwell que mostra o caráter conservativo do fluxo magnético é:

$$\text{div} \vec{B} = 0. \quad (2.16)$$

Sabendo-se que as grandezas \vec{B} e \vec{H} estão relacionadas entre si através da expressão:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (2.17)$$

a equação (2.16) passa a ser:

$$\text{div} \vec{H} = 0. \quad (2.18)$$

Desta forma, a equação (2.18) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{H} = 0. \quad (2.19)$$

A equação da continuidade elétrica é dada por:

$$\operatorname{div} \vec{J} = 0. \quad (2.20)$$

Através das equações (2.19) e (2.20) chega-se a outra equação de Maxwell que indica qualitativamente e quantitativamente a formação de \vec{H} a partir de \vec{J} :

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}. \quad (2.21)$$

Nesta expressão, conhecida como lei de Ampère, somente as correntes de condução (que fluem pelos condutores) são consideradas. Isto porque, em baixas frequências (p. ex., 50 Hz ou 60 Hz), as correntes de deslocamento são menores que as correntes de condução $\left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \ll \vec{J} \right)$ [26].

Integrando os dois lados de (2.21) através de uma superfície S arbitrária, obtém-se:

$$\iint_S \operatorname{rot} \vec{H} \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}, \quad (2.22)$$

onde S é uma superfície em que \vec{H} e \vec{J} estão definidos. Utilizando o teorema de Stokes, o lado esquerdo da expressão pode ser escrito como:

$$\iint_S \operatorname{rot} \vec{H} \cdot d\vec{S} = \oint_{L(S)} \vec{H} \cdot d\vec{l}, \quad (2.23)$$

onde $L(S)$ é a linha que limita a superfície S . O lado direito da expressão representa o fluxo do vetor \vec{J} através de S , que é a corrente de condução I atravessando S . Desta forma, obtém-se:

$$\oint_{L(S)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I, \quad (2.24)$$

que indica que a circulação de \vec{H} ao longo de um caminho $L(S)$ que envolve uma secção S é igual a corrente atravessando esta secção. A equação (2.24) corresponde à forma integral da Lei de Ampère [26].

Para o caso das LTs de potência, cada condutor será considerado como um fio infinito de secção transversal circular, percorrido por uma corrente I e paralelo ao plano do solo. Desta forma, para usar da simetria e simplificar os cálculos, a superfície S de integração para cada condutor corresponde a um círculo de raio R . Ao longo de $L(S)$, os vetores \vec{H} e $d\vec{l}$ são colineares e de mesmo sentido. Como H é constante ao longo de $L(S)$, tem-se:

$$H \oint_{L(S)} dl = I. \quad (2.25)$$

Como o comprimento de $L(S)$ é igual a $2\pi R$, obtém-se:

$$H 2\pi R = I, \quad (2.26)$$

e finalmente a expressão para o campo magnético gerado por um fio infinito percorrido por uma corrente I é igual a:

$$H = \frac{I}{2\pi R}. \quad (2.27)$$

Sendo assim, a indução magnética para um fio infinito percorrido por uma corrente I é igual a [26]:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}, \quad (2.28)$$

onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$ (permeabilidade magnética do vácuo).

2.5.2 Cálculo do campo magnético produzido pelos condutores de uma LT

Para as LTs aqui estudadas, as correntes são alternadas e a corrente I para cada condutor corresponde a um fasor, possuindo uma parte real e outra imaginária. Assim, a indução magnética gerada por cada condutor também é um fasor e a expressão passa a ser:

$$\dot{B} = \frac{\mu_0 \dot{I}}{2\pi R}. \quad (2.29)$$

Neste estudo, o solo terrestre será considerado como sendo “transparente” à passagem do campo magnético. Esta simplificação pode ser feita porque a permeabilidade magnética da terra é aproximadamente igual à permeabilidade magnética do ar, ou seja, $\mu = \mu_0$ ($\mu_r = 1$). Além disso, o solo é considerado material não magnético e sua presença não altera a distribuição do campo magnético. O efeito pelicular também pode ser desprezado nas frequências usuais de operação.

Consideremos um condutor a percorrido por uma corrente \dot{I}_a . As coordenadas do condutor a são (x_a, y_a) , conforme mostra a fig. 2.6.

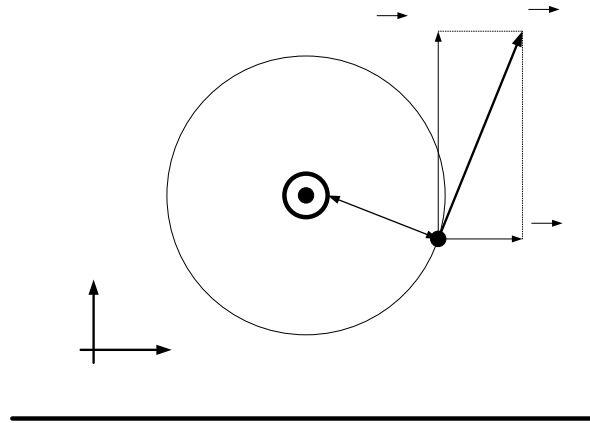


Figura 2.6. Condutor a percorrido pela corrente I_a e induções magnéticas (\vec{B}_{xa} , \vec{B}_{ya} e \vec{B}_r) geradas no ponto $P(x, y)$.

As componentes fasoriais horizontal (\dot{B}_{xa}) e vertical (\dot{B}_{ya}) da intensidade da indução magnética em (x, y) geradas pelo condutor a , são expressas por [27,28]:

$$\dot{B}_{xa} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{I_a(y_a - y)}{(x - x_a)^2 + (y_a - y)^2} \right] \quad \mathbf{y} \quad (2.30)$$

e

$$\dot{B}_{ya} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{I_a(x - x_a)}{(x - x_a)^2 + (y_a - y)^2} \right]. \quad \mathbf{x} \quad (2.31)$$

Generalizando para n condutores, a indução magnética resultante será o somatório das contribuições de todos os condutores. As expressões para a indução magnética resultante nas direções horizontal e vertical são dadas por [27,28]:

$$\dot{B}_{xt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n I_i \left[\frac{(y_i - y)}{(x - x_i)^2 + (y_i - y)^2} \right] \quad (2.32)$$

e

$$\dot{B}_{yt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n I_i \left[\frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y_i - y)^2} \right]. \quad (2.33)$$

A indução magnética resultante é dada por:

$$B = \sqrt{|\dot{B}_{xt}|^2 + |\dot{B}_{yt}|^2}. \quad (2.34)$$

Como antes, este valor corresponde à indução magnética eficaz no ponto considerado, pois as correntes das fases são eficazes.

Para exemplificação da aplicação deste método, será apresentado o cálculo de uma linha fictícia com dois condutores percorridos por correntes alternadas.

2.5.3 Exemplo de cálculo do campo magnético gerado por uma LT com dois condutores percorridos por corrente.

Seja uma linha com duas fases com disposição idêntica à linha analisada na Seção 2.3.3. Cada fase corresponde a um fio condutor percorrido por uma corrente de 1000 A eficazes. A distância horizontal entre as fases é de 5 m. A altura média do condutor da fase A é de 15 m e da fase B, 20 m, conforme mostra a fig. 2.7. Será calculado o campo magnético resultante no ponto P (20 ; 2) no referencial Oxy, considerando-se a origem das coordenadas no solo, sob a fase A.

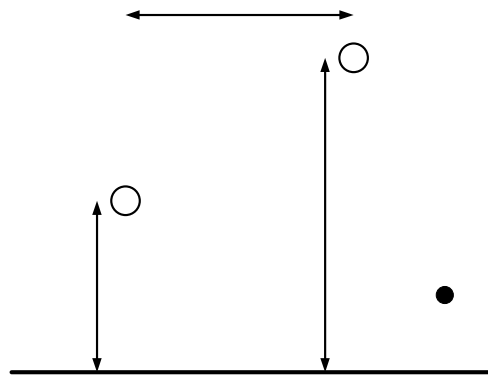


Figura 2.7. Condutores A e B de uma LT bifásica e o ponto P (20 ; 2), no qual se deseja calcular a intensidade resultante (eficaz) da indução magnética.

Considerando-se as correntes como:

$$\dot{I}_a = I_{m\acute{a}x} [\cos(\omega t) + j \text{sen}(\omega t)];$$

$$\dot{I}_b = I_{m\acute{a}x} \left[\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + j \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right].$$

Para $I_{m\acute{a}x} = 1000 \text{ A}$ e $\omega t = 0$:

$$\dot{I}_a = 1000 \angle 0^\circ \text{ A} = (1000 + j 0) \text{ A};$$

$$\dot{I}_b = 1000 \angle 120^\circ \text{ A} = (-500 + j 866) \text{ A}.$$

Assim, as componentes \dot{B}_{xa} e \dot{B}_{xb} valem respectivamente:

A

$h_a = 15 \text{ m}$

$$\dot{B}_{xa} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{(1000 + j 0)(15 - 2)}{(20 - 0)^2 + (15 - 2)^2} \right] = (4,5694 + j 0) \mu T ;$$

$$\dot{B}_{xb} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{(-500 + j 866)(20 - 2)}{(20 - 5)^2 + (20 - 2)^2} \right] = (-3,2787 + j 5,6787) \mu T .$$

A componente resultante \dot{B}_{xt} vale:

$$\dot{B}_{xt} = \dot{B}_{xa} + \dot{B}_{xb} = (1,2907 + j 5,6787) \mu T .$$

Calculando as componentes \dot{B}_{ya} e \dot{B}_{yb} , tem-se:

$$\dot{B}_{ya} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{(1000 + j 0)(20 - 0)}{(20 - 0)^2 + (20 - 2)^2} \right] = (5,5248 + j 0) \mu T ;$$

$$\dot{B}_{yb} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{(-500 + j 866)(20 - 5)}{(20 - 5)^2 + (20 - 2)^2} \right] = (-2,7322 + j 4,7322) \mu T .$$

A componente resultante \dot{B}_{yt} vale:

$$\dot{B}_{yt} = \dot{B}_{ya} + \dot{B}_{yb} = (2,7927 + j 4,7322) \mu T .$$

Desta forma, o valor eficaz da indução magnética resultante B no instante de tempo considerado vale:

$$B = \sqrt{(1,2907)^2 + (5,6787)^2 + (2,7927)^2 + (4,7322)^2} \cong 8 \mu T .$$

2.5.4 Casos estudados

Neste tópico são analisadas as topologias mais usuais de LTs de potência. São consideradas as topologias de LTs de circuito simples, tais como: LT trifásica horizontal, vertical, delta e delta invertido. São também analisadas as topologias de LTs de circuito duplo, tais como LT trifásica com circuito duplo horizontal e vertical.

Inicialmente, cada topologia é analisada e são escritas as equações para o cálculo analítico das componentes fasoriais horizontal e vertical da indução magnética, bem como a da indução magnética eficaz em duas dimensões (2D).

Indução magnética gerada por um condutor retilíneo infinito

Inicialmente será considerado o caso de uma LT monofásica constituída de um condutor único a uma altura h acima do solo, percorrido por uma corrente \dot{I} , conforme fig.2.8.

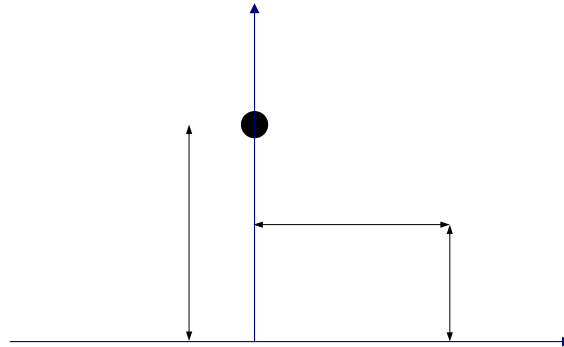


Figura 2.8. Condutor retilíneo infinito percorrido por uma corrente \dot{I} .

As componentes da indução magnética bem como seu valor eficaz no ponto P podem ser calculados conforme abaixo:

- (i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{Xp} = \frac{\mu_0 \dot{I}(h - y_P)}{2\pi(x_P^2 + (h - y_P)^2)}; \quad (2.35)$$

- (ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{Yp} = \frac{\mu_0 \dot{I}x_P}{2\pi(x_P^2 + (h - y_P)^2)}; \quad (2.36)$$

- (iii) Indução magnética eficaz no ponto P :

$$B_P = \sqrt{|\dot{B}_{Xp}|^2 + |\dot{B}_{Yp}|^2}. \quad (2.37)$$

A fig. 2.9 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma linha colocada a uma altura de 12 m e percorrida por uma corrente de 1000 A. Nos gráficos, x corresponde à distância medida a partir da origem das coordenadas (ao pé da linha vertical que passa pelo condutor). Devido à simetria, somente foram apresentados os resultados para os valores positivos de x .

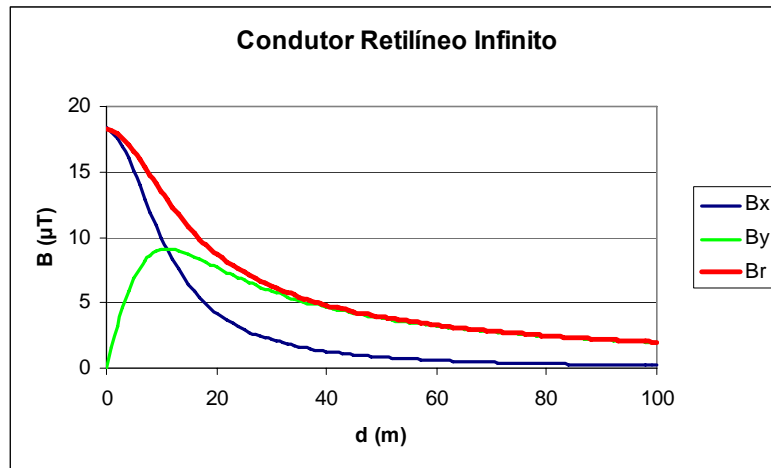


Figura 2.9. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I} = 1000\angle 0^\circ A$, $h = 12$ m e $y_p = 1$ m.

Como esperado, a indução magnética é máxima no ponto mais próximo ao condutor e decai à medida que se afasta da LT.

Indução magnética gerada por uma LT bifásica horizontal

Neste caso tem-se uma LT bifásica composta de dois condutores paralelos separados por uma distância d e a uma altura h do solo, como mostra a fig. 2.10. As correntes que fluem nos condutores têm fases opostas.

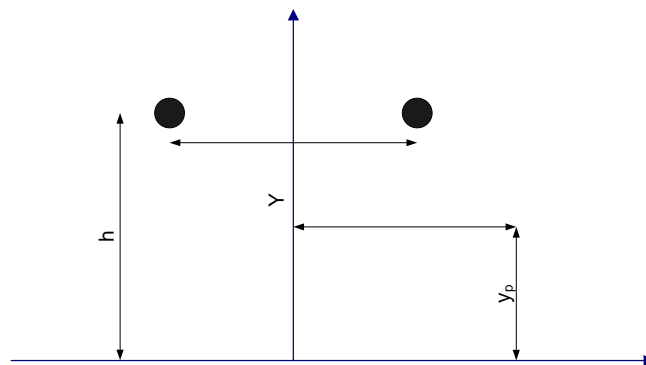


Figura 2.10. LT bifásica horizontal.

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

- (i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{x_p} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(h - y_p)\dot{I}_1}{\left(x_p + \frac{d}{2}\right)^2 + (h - y_p)^2} + \frac{(h - y_p)\dot{I}_2}{\left(x_p - \frac{d}{2}\right)^2 + (h - y_p)^2} \right]; \quad (2.38)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P:

$$\dot{B}_{Y_P} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(x_P + \frac{d}{2})\dot{I}_1}{(x_P + \frac{d}{2})^2 + (h - y_P)^2} + \frac{(x_P - \frac{d}{2})\dot{I}_2}{(x_P - \frac{d}{2})^2 + (h - y_P)^2} \right]. \quad (2.39)$$

A fig. 2.11 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para condutores colocados a uma altura de 12 m, separados por $d = 2$ m e percorridos por correntes de mesma magnitude (1000 A).

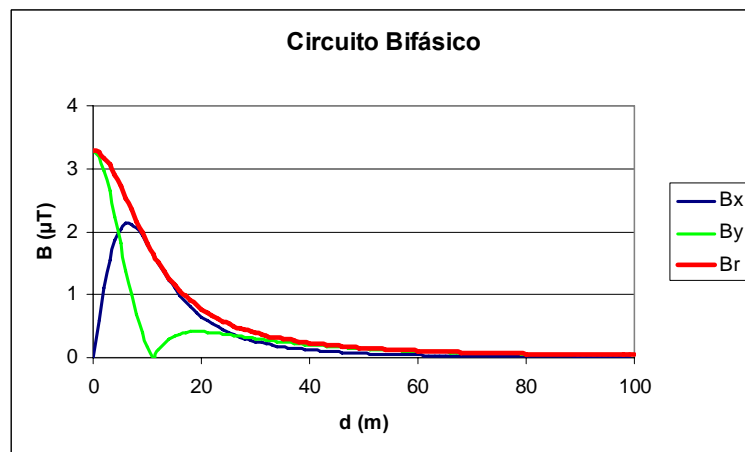


Figura 2.11. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000\angle 180^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como antes, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT. Os valores de indução são menores do que no caso precedente uma vez que, aqui, há um certo grau de cancelamento provocado pelas correntes iguais e opostas nos condutores, o que não acontecia antes.

Indução magnética gerada por uma LT trifásica horizontal

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de três condutores paralelos com uma distância d entre fases adjacentes e todos a uma altura h do solo, como mostra a fig. 2.12. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, para LTs equilibradas, têm a mesma magnitude.

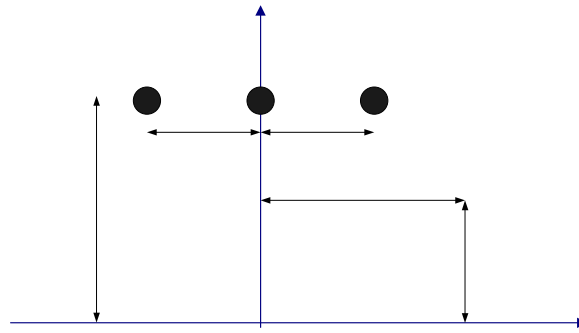


Figura 2.12. LT trifásica horizontal.

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

- (i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{x_p} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(h-y_p)\dot{I}_1}{(x_p+d)^2 + (h-y_p)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_2}{x_p^2 + (h-y_p)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_3}{(x_p-d)^2 + (h-y_p)^2} \right]; \quad (2.40)$$

- (ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{y_p} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(x_p+d)\dot{I}_1}{(x_p+d)^2 + (h-y_p)^2} + \frac{x_p\dot{I}_2}{x_p^2 + (h-y_p)^2} + \frac{(x_p-d)\dot{I}_3}{(x_p-d)^2 + (h-y_p)^2} \right]. \quad (2.41)$$

A fig. 2.13 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma LT equilibrada com condutores colocados a uma altura de 12 m, separados por $d = 2$ m, e percorridos por correntes de 1000 A.

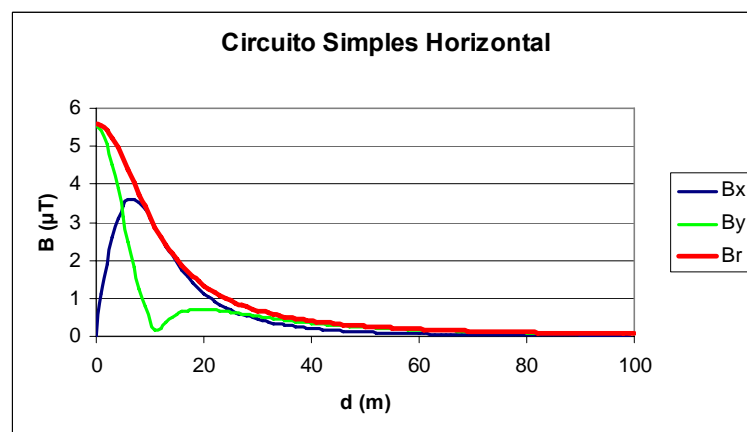


Figura 2.13. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000\angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como nos casos precedentes, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT.

Indução magnética gerada por uma LT trifásica vertical

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de três condutores paralelos com uma distância d entre fases adjacentes e altura mínima h em relação ao solo, como mostra a fig. 2.14. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, para LTs equilibradas, têm a mesma magnitude.

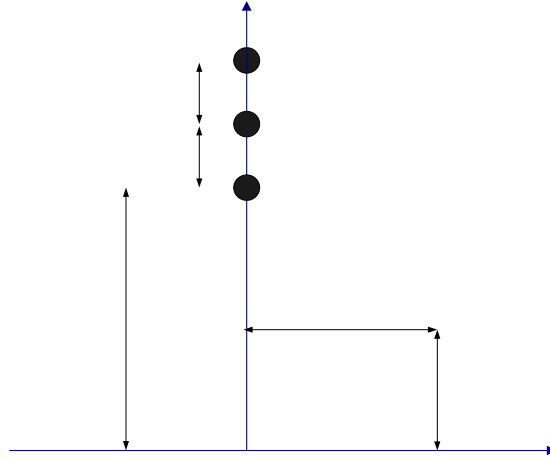


Figura 2.14. LT trifásica vertical.

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

(i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P : P

$$\dot{B}_{Xp} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(2d+h-y_p)\dot{I}_1}{x_p^2 + (2d+h-y_p)^2} + \frac{(d+h-y_p)\dot{I}_2}{x_p^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_3}{x_p^2 + (h-y_p)^2} \right]; \quad (2.42) \quad \text{P}$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{Yp} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{x_p\dot{I}_1}{x_p^2 + (2d+h-y_p)^2} + \frac{x_p\dot{I}_2}{x_p^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{x_p\dot{I}_3}{x_p^2 + (h-y_p)^2} \right]. \quad (2.43) \quad \text{Y}$$

A fig. 2.15 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma LT equilibrada com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m, e percorridos por correntes de 1000 A.

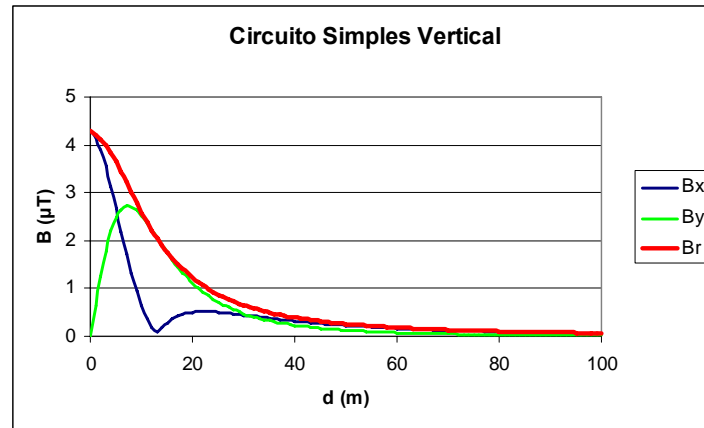


Figura 2.15. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000\angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como antes, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT.

Indução magnética gerada por uma LT trifásica delta

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de três condutores paralelos com uma distância d entre fases adjacentes e altura mínima h em relação ao solo, como mostra a fig. 2.16. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, para LTs equilibradas, têm a mesma magnitude.

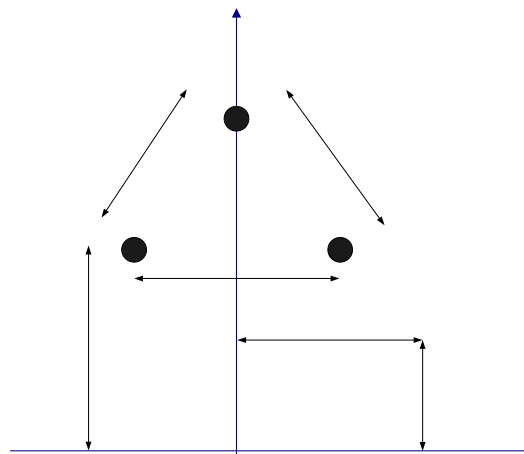


Figura 2.16. LT trifásica delta.

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

- (i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{Xp} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(h-y_p)\dot{I}_1}{(x_p + \frac{d}{2})^2 + (h-y_p)^2} + \frac{(\frac{\sqrt{3}}{2}d + h - y_p)\dot{I}_2}{x_p^2 + (\frac{\sqrt{3}}{2}d + h - y_p)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_3}{(x_p - \frac{d}{2})^2 + (h-y_p)^2} \right]; \quad (2.44)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P:

$$\dot{B}_{Yp} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(x_p + \frac{d}{2})\dot{I}_1}{(x_p + \frac{d}{2})^2 + (h-y_p)^2} + \frac{x_p\dot{I}_2}{x_p^2 + (\frac{\sqrt{3}}{2}d + h - y_p)^2} + \frac{(x_p - \frac{d}{2})\dot{I}_3}{(x_p - \frac{d}{2})^2 + (h-y_p)^2} \right]. \quad (2.45)$$

A fig. 2.17 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma LT equilibrada com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m, e percorridos por correntes de 1000 A.

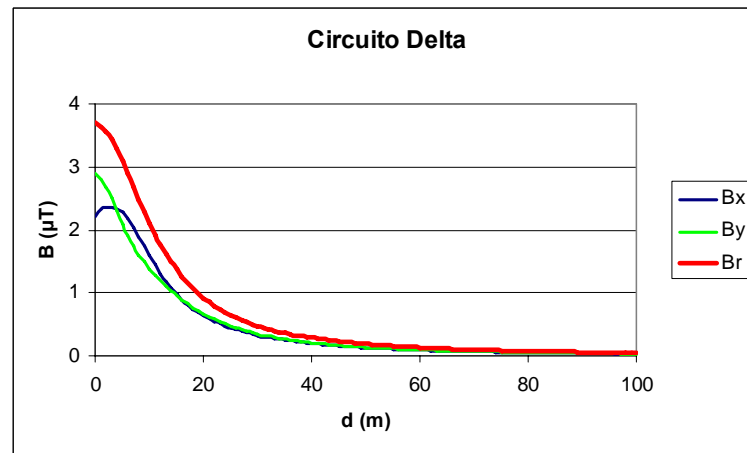


Figura 2.17. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000\angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como antes, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT.

Indução magnética gerada por uma LT trifásica delta invertido

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de três condutores paralelos com uma distância d entre fases adjacentes e altura mínima h em relação ao solo, como mostra a fig. 2.18. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, para LTs equilibradas, têm a mesma magnitude.

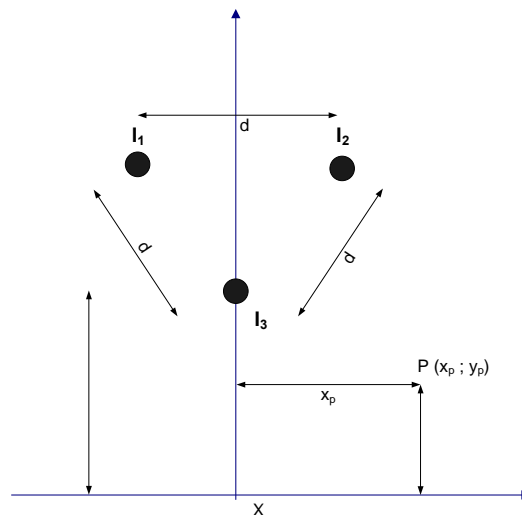


Figura 2.18. LT trifásica delta invertido.

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

(i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{Xp} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_p\right)\dot{I}_1}{\left(x_p+\frac{d}{2}\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_p\right)^2} + \frac{\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_p\right)\dot{I}_2}{\left(x_p-\frac{d}{2}\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_p\right)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_3}{x_p^2+(h-y_p)^2} \right]; \quad (2.46)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{Yp} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\left(x_p+\frac{d}{2}\right)\dot{I}_1}{\left(x_p+\frac{d}{2}\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_p\right)^2} + \frac{\left(x_p-\frac{d}{2}\right)\dot{I}_2}{\left(x_p-\frac{d}{2}\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_p\right)^2} + \frac{x_p\dot{I}_3}{x_p^2+(h-y_p)^2} \right]. \quad (2.47)$$

A fig. 2.19 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma LT equilibrada com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m, e percorridos por correntes de 1000 A.

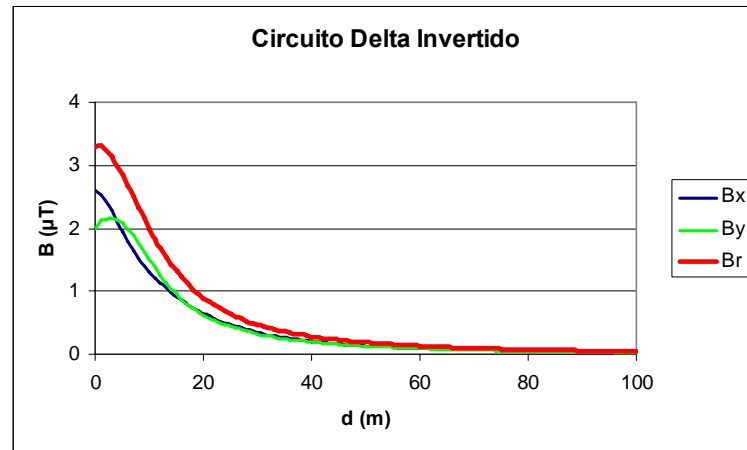


Figura 2.19. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000\angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como antes, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT.

Indução magnética gerada por uma LT trifásica delta especial I

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de três condutores paralelos com uma distância d entre fases adjacentes e altura mínima h em relação ao solo, como mostra a fig. 2.20. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, para LTs equilibradas, têm a mesma magnitude.

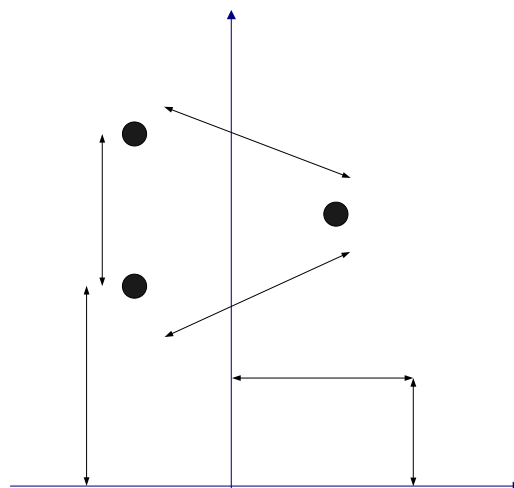


Figura 2.20. LT trifásica delta especial I.

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

- (i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{x_p} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(d+h-y_p)\dot{I}_1}{\left(x_p + \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{\left(\frac{d}{2}+h-y_p\right)\dot{I}_2}{\left(x_p - \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + \left(\frac{d}{2}+h-y_p\right)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_3}{\left(x_p + \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + (h-y_p)^2} \right]; \quad (2.48)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P:

$$\dot{B}_{y_p} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\left(x_p + \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)\dot{I}_1}{\left(x_p + \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{\left(x_p - \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)\dot{I}_2}{\left(x_p - \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + \left(\frac{d}{2}+h-y_p\right)^2} + \frac{\left(x_p + \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)\dot{I}_3}{\left(x_p + \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + (h-y_p)^2} \right]. \quad (2.49)$$

A fig. 2.21 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma LT equilibrada com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m, e percorridos por correntes de 1000 A.

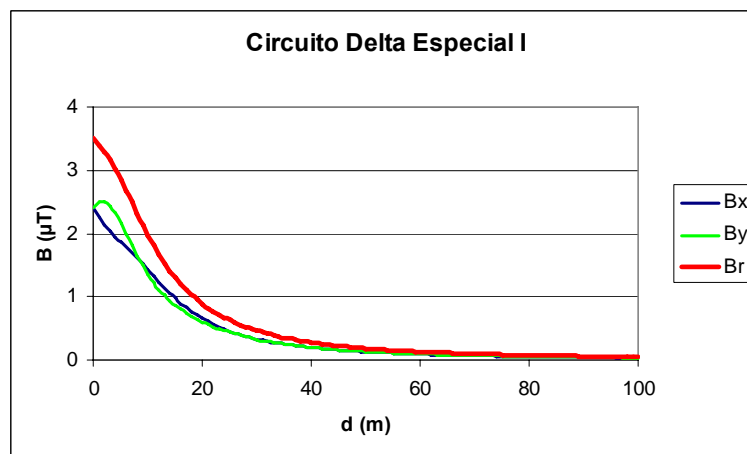


Figura 2.21. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000\angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como antes, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT.

Indução magnética gerada por uma LT trifásica delta especial II

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de três condutores paralelos com uma distância d entre fases adjacentes e altura mínima h em relação ao solo, como mostra a fig. 2.22. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, para LTs equilibradas, têm a mesma magnitude.

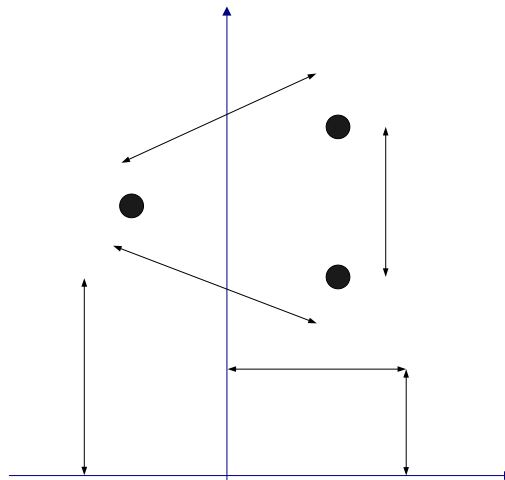


Figura 2.22. LT trifásica delta especial II.

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

(i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{X_P} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(d+h-y_P)\dot{I}_1}{\left(x_P - \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + (d+h-y_P)^2} + \frac{(h-y_P)\dot{I}_2}{\left(x_P - \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + (h-y_P)^2} + \frac{\left(\frac{d}{2} + h - y_P\right)\dot{I}_3}{\left(x_P + \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + \left(\frac{d}{2} + h - y_P\right)^2} \right]; \quad (2.50)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{Y_P} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\left(x_P - \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)\dot{I}_1}{\left(x_P - \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + (d+h-y_P)^2} + \frac{\left(x_P - \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)\dot{I}_2}{\left(x_P - \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + (h-y_P)^2} + \frac{\left(x_P + \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)\dot{I}_3}{\left(x_P + \frac{\sqrt{3}}{4}d\right)^2 + \left(\frac{d}{2} + h - y_P\right)^2} \right]. \quad (2.51)$$

A fig. 2.23 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma LT equilibrada com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m, e percorridos por correntes de 1000 A.

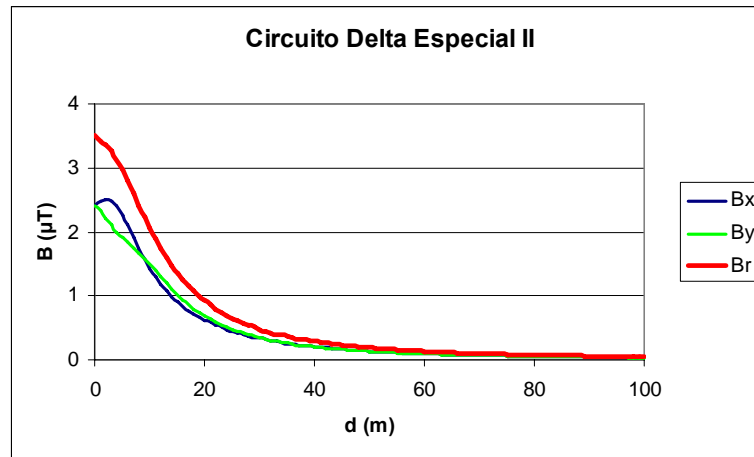


Figura 2.23. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 1000\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000\angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como antes, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT.

Indução magnética gerada por uma LT trifásica horizontal com circuito duplo

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de seis condutores paralelos com uma distância d entre fases adjacentes na direção horizontal e D entre fases adjacentes na direção vertical e, a uma altura mínima h do solo, como mostra a fig. 2.24. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, para LTs equilibradas, têm a mesma magnitude.

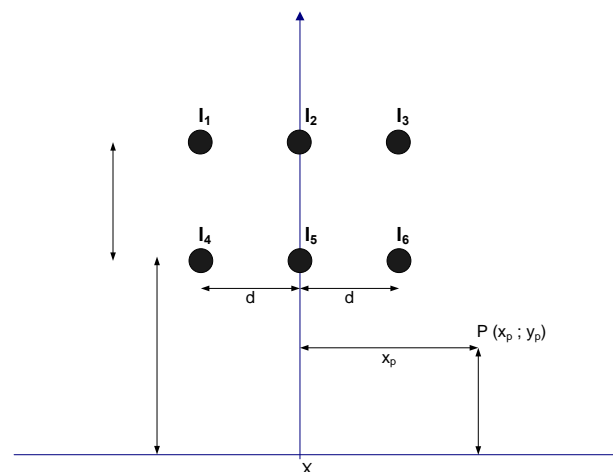


Figura 2.24. LT trifásica horizontal com circuito duplo.

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

- (i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{x_p} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{aligned} & \frac{(D+h-y_p)\dot{I}_1}{(x_p+d)^2 + (D+h-y_p)^2} + \frac{(D+h-y_p)\dot{I}_2}{x_p^2 + (D+h-y_p)^2} + \frac{(D+h-y_p)\dot{I}_3}{(x_p-d)^2 + (D+h-y_p)^2} + \\ & \frac{(h-y_p)\dot{I}_4}{(x_p+d)^2 + (h-y_p)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_5}{x_p^2 + (h-y_p)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_6}{(x_p-d)^2 + (h-y_p)^2} \end{aligned} \right]; \quad (2.52)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P:

$$\dot{B}_{y_p} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{aligned} & \frac{(x_p+d)\dot{I}_1}{(x_p+d)^2 + (D+h-y_p)^2} + \frac{x_p\dot{I}_2}{x_p^2 + (D+h-y_p)^2} + \frac{(x_p-d)\dot{I}_3}{(x_p-d)^2 + (D+h-y_p)^2} + \\ & \frac{(x_p+d)\dot{I}_4}{(x_p+d)^2 + (h-y_p)^2} + \frac{x_p\dot{I}_5}{x_p^2 + (h-y_p)^2} + \frac{(x_p-d)\dot{I}_6}{(x_p-d)^2 + (h-y_p)^2} \end{aligned} \right]. \quad (2.53)$$

A fig. 2.25 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma LT equilibrada com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m e $D = 3$ m, e percorridos por correntes de 500 A. Este valor de corrente foi escolhido de modo que a LT transporte a mesma potência total das LTs trifásicas precedentes.

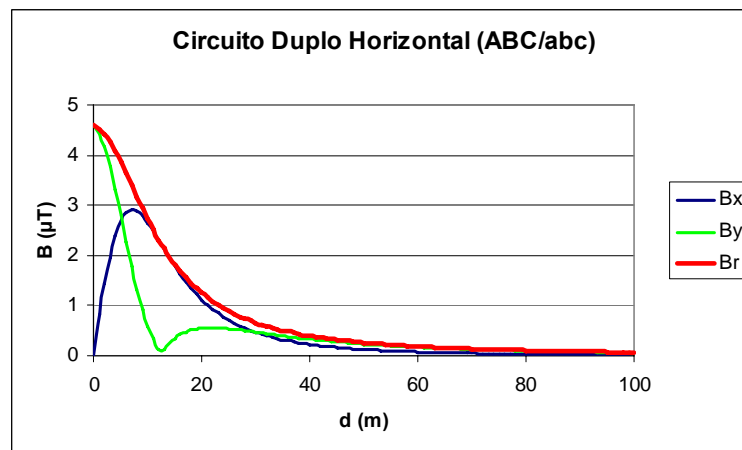


Figura 2.25. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 500\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 500\angle -120^\circ A$, $\dot{I}_4 = 500\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_5 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_6 = 500\angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como antes, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT.

Indução magnética gerada por uma LT trifásica vertical com circuito duplo

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de seis condutores paralelos com uma distância d entre fases adjacentes na direção vertical e D entre fases adjacentes na direção horizontal, e a uma altura mínima h do solo, como mostra a fig. 2.26. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, para LTs equilibradas, têm a mesma magnitude.

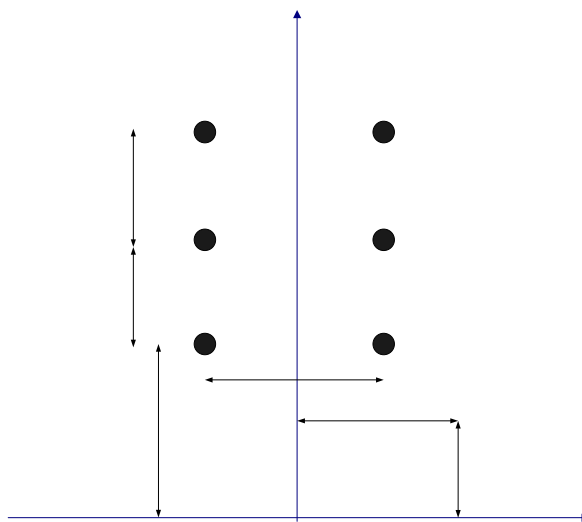


Figura 2.26. LT trifásica vertical com circuito duplo.

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

(i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{x_p} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{array}{l} \frac{(2d+h-y_p)\dot{I}_1}{(x_p+\frac{D}{2})^2+(2d+h-y_p)^2} + \frac{(d+h-y_p)\dot{I}_2}{(x_p+\frac{D}{2})^2+(d+h-y_p)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_3}{(x_p+\frac{D}{2})^2+(h-y_p)^2} + \\ \frac{(2d+h-y_p)\dot{I}_4}{(x_p-\frac{D}{2})^2+(2d+h-y_p)^2} + \frac{(d+h-y_p)\dot{I}_5}{(x_p-\frac{D}{2})^2+(d+h-y_p)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_6}{(x_p-\frac{D}{2})^2+(h-y_p)^2} \end{array} \right]; \quad (2.54)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{y_p} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{array}{l} \frac{(x_p+\frac{D}{2})\dot{I}_1}{(x_p+\frac{D}{2})^2+(2d+h-y_p)^2} + \frac{(x_p+\frac{D}{2})\dot{I}_2}{(x_p+\frac{D}{2})^2+(d+h-y_p)^2} + \frac{(x_p+\frac{D}{2})\dot{I}_3}{(x_p+\frac{D}{2})^2+(h-y_p)^2} + \\ \frac{(x_p-\frac{D}{2})\dot{I}_4}{(x_p-\frac{D}{2})^2+(2d+h-y_p)^2} + \frac{(x_p-\frac{D}{2})\dot{I}_5}{(x_p-\frac{D}{2})^2+(d+h-y_p)^2} + \frac{(x_p-\frac{D}{2})\dot{I}_6}{(x_p-\frac{D}{2})^2+(h-y_p)^2} \end{array} \right]. \quad (2.55)$$

A fig. 2.27 mostra os valores de indução calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma LT equilibrada com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m e $D = 3$ m, e percorridos por correntes de 500 A.

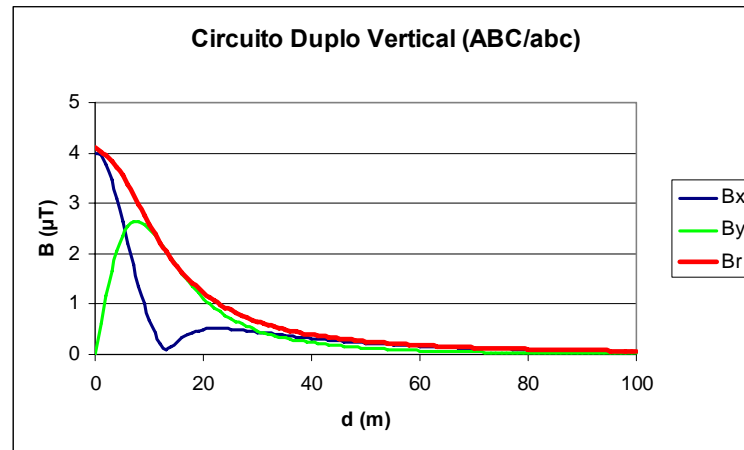


Figura 2.27. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 500\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 500\angle -120^\circ A$, $\dot{I}_4 = 500\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_5 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_6 = 500\angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como em todos os casos anteriores, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT.

2.6 Mapa de induções para um caso particular

Abaixo está ilustrado um mapa de induções para um caso particular. Para cada topologia determinou-se o valor da indução magnética a 20 m do centro geométrico da mesma e para uma altura de 1 m em relação ao solo.

Tabela 2.1. Mapa de induções magnéticas para $d = 20$ m.

Topologia	B (μT)
Condutor retilíneo infinito	8,75
LT bifásica horizontal	0,75
LT trifásica horizontal	1,40
LT trifásica vertical	1,20
LT trifásica delta	0,90
LT trifásica delta invertido	0,85
LT trifásica delta especial I	0,87
LT trifásica delta especial II	0,90
LT trifásica horizontal (ABC//abc)	1,30
LT trifásica vertical (ABC//abc)	1,25

Através dos resultados obtidos pode-se perceber que as topologias delta são as que apresentam os menores valores de indução magnética para o caso particular em questão.

2.7 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as equações para o cálculo do campo elétrico e do campo magnético ELF (“Extremely Low Frequency”) gerados por LTs de potência.

Para o cálculo do campo elétrico gerado pelas LTs de potência, foi estudado o método das cargas equivalentes, que é um método bastante utilizado na prática. Como o regime de operação é em corrente alternada, o campo elétrico resultante é um fasor, ou seja, em cada direção (x e y) existe uma parcela de campo real e uma parcela de campo imaginária.

Com relação ao cálculo de campos magnéticos, foram apresentadas as equações analíticas para o cálculo da indução magnética das topologias mais usuais de LTs. Percebeu-se que o campo magnético também é um fasor, ou seja, em cada direção (x e y) existe uma parcela de campo real e uma parcela de campo imaginária.

Várias simulações em MATLAB foram feitas para a determinação da intensidade da indução magnética gerada pelas LTs no nível do solo. Percebeu-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT. Um mapa de induções magnéticas para um caso particular foi determinado e chegou-se à conclusão de que as topologias delta são as que produzem a menor indução magnética.

Capítulo 3 Técnicas para redução de campos magnéticos gerados por linhas de transmissão de potência

3.1 Introdução

Neste capítulo, serão estudadas algumas técnicas utilizadas para redução de campos magnéticos gerados por LTs de potência. Existem várias técnicas disponíveis para redução de campos magnéticos gerados por LTs, dentre as quais podem-se citar: divisão dos condutores da LT (“phase splitting”), elevação da altura da LT, compactação dos condutores da LT, balanceamento das correntes de fase da LT, otimização do arranjo de fases da LT, transmissão polifásica, entre outras.

O objetivo deste capítulo é apresentar a aplicação de algumas destas técnicas às topologias aqui estudadas, sendo investigado quais topologias são mais eficientes na redução dos campos magnéticos. É também feita uma análise de custo baseada na técnica de redução de campo magnético empregada.

3.2 Introdução às técnicas de redução de campos magnéticos

Recentemente tem havido muito interesse nos campos magnéticos gerados por LTs de potência e também nos campos elétricos induzidos devido à variação destes campos magnéticos, os quais constituiriam um risco à saúde dos seres vivos. Isto tem estimulado a busca por métodos de arranjo de condutores que levam a uma redução nos campos magnéticos por eles gerados.

Muitos artigos discutindo a divisão de fases (“phase splitting”) de LTs trifásicas têm sido publicados. Kaune e Zaffanella [29] desenvolveram um modelo baseado em momentos de dipolos equivalentes (momentos magnéticos produzidos por circuitos bifásicos que transportam a mesma corrente) e Pettersson e Eriksson [30] propuseram uma versão simplificada deste método. Pettersson [31] defende a importância de um aprofundamento no estudo de física básica de geração de campos como uma importante ajuda para sugerir configurações de LTs adequadas para análises (simulações) em computadores. Ele apresenta um modelo através do qual um sistema trifásico (sistema de três condutores) é reduzido a dois sistemas bifásicos. Mostra também que, para um sistema de seis condutores, estando todos em dipolos de fase (dois circuitos trifásicos com arranjo de fases otimizado), pode-se fazer um grande cancelamento de campos e desta forma, a taxa de decaimento da indução magnética resultante é igual a $1/r^3$. Zaffanella [32] apresenta uma revisão das fontes de campo, suas características e gerenciamento (métodos de controle). Pettersson [33,34] apresenta versões atualizadas e melhoradas de modelos mais recentes, também estendidos a estruturas em que duas fases são trançadas em torno da terceira fase (“twisting method”).

O primeiro estudo analítico de campos magnéticos devido a condutores helicoidais foi publicado por Buchholz [35,36] na Alemanha, e mais tarde discutido em um número de artigos que inclui aqueles de Alksne [37], Moser e Spencer [38], Shenfeld [39], Haber [40], Hagel et al. [41], e recentemente por Pettersson e Schönborg [42,43], que também fornecem extensas referências. O método é baseado no cálculo do potencial vetor magnético, e a partir deste, das componentes de campo. Para sistemas trifásicos com condutores divididos, os trabalhos de Buchholz apresentam os parâmetros relevantes que controlam o campo distante, e as condições gerais para o arranjo dos condutores, de tal

forma que a intensidade da indução magnética em torno dos condutores decaia a uma taxa de $1/r^3$.

Na seqüência do capítulo, são estudadas e aplicadas as técnicas para redução de campos magnéticos gerados por LTs de potência. Cada técnica é aplicada às topologias aqui analisadas, sendo sempre investigadas as topologias que se demonstraram mais eficientes na redução da intensidade da indução magnética.

Por fim, faz-se uma análise de custo para a aplicação de cada técnica nas diversas topologias de linha estudadas bem como a eficácia de cada uma destas técnicas na redução da intensidade da indução magnética ao nível do solo.

3.2.1 Configurações básicas de campo

Como é bem conhecido, o campo magnético em torno de um longo condutor retilíneo forma linhas de campo circulares e concêntricas (fig. 3.1). Se a corrente no condutor é I , a intensidade da indução magnética B , conforme visto no capítulo precedente, vale $B = \mu_0 I / 2\pi r$ e decai com a distância a uma taxa igual a $1/r$.

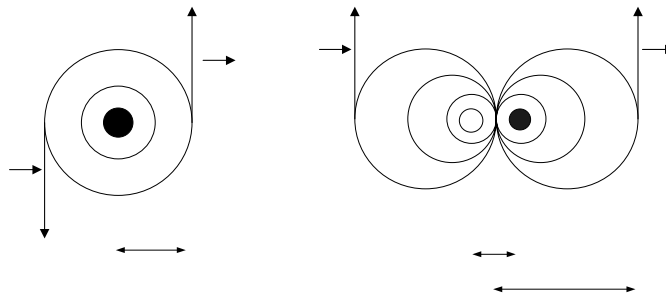


Figura 3.1. Configurações de indução magnética em torno de condutores percorridos por corrente.
a) Condutor único. b) Dois condutores com separação $2a$.

O campo produzido por dois condutores, com uma separação igual a $2a$, conduzindo a mesma corrente em direções opostas, também possui linhas de campo circulares (fig. 3.1b). O parâmetro essencial, que determina a intensidade do campo é a/r^2 . Se a pudesse ser reduzido a zero, o campo magnético desapareceria.

Assim, um princípio geral para redução do campo magnético consiste em manter as distâncias entre os condutores conduzindo a mesma corrente em direções opostas tão pequenas quanto possível.

3.2.2 Cancelamento parcial do campo magnético

A fig. 3.2a mostra a secção transversal de uma LT trifásica com condutores de fase R , S e T , perpendiculares ao plano do papel, e arranjados como um triângulo equilátero em torno de um centro C . Presume-se que a soma das correntes instantâneas é sempre zero, isto é, nenhuma corrente retorna através da terra (isto corresponde ao método normal de operação). O campo magnético no ponto F_1 é composto pelas contribuições das correntes I_R , I_S e I_T , e pode ser facilmente calculado. Por razão de simplicidade, estuda-se o campo

em um instante em que a corrente em R é máxima, e esta retorna através das fases S e T , de tal forma que $i_S = i_T = -i_R / 2$. No ponto F_1 , as componentes de indução magnética B_R (dirigida para cima), e $B_S + B_T$ (dirigidas para baixo) são somadas. A componente B_R possui maior intensidade, pois a distância $R-F_1$ é menor do que a distância $S-F_1$ e $T-F_1$. A resultante B_{F1} apontará para cima. Uma discussão análoga aplicada ao ponto F_2 mostra que a resultante B_{F2} também apontará para cima.

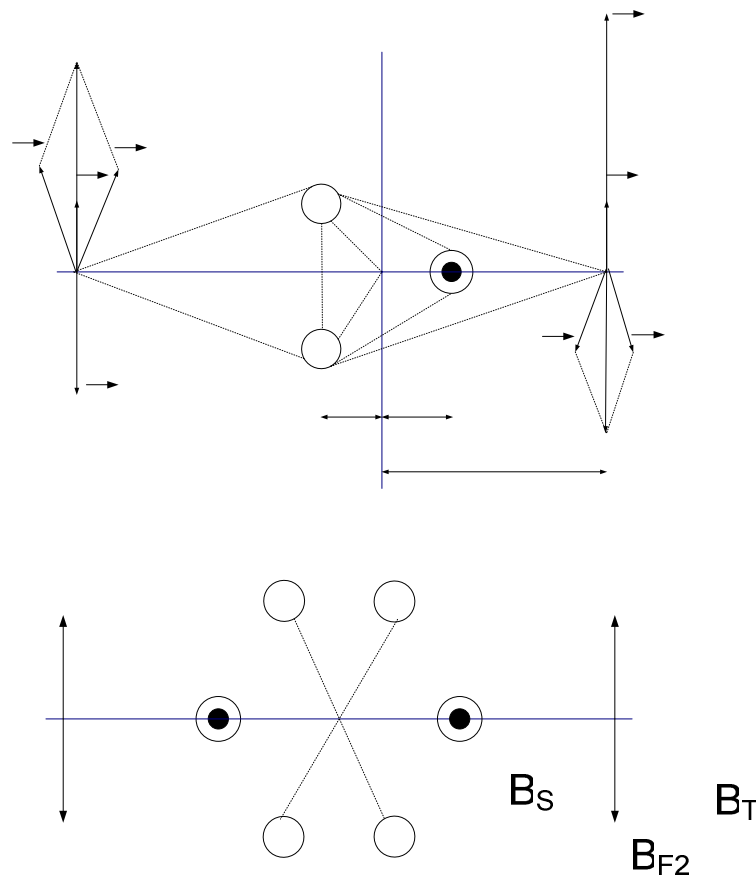


Figura 3.2. LT trifásica.

- a) Induções magnéticas geradas em F_1 e F_2 .
 b) Induções magnéticas resultantes em F_1 e F_2 .

Neste ponto, assume-se que todo sistema de condutores é rotacionado de 180° em torno de C . As resultantes em F_1 e F_2 estarão agora dirigidas para baixo. Se os dois sistemas de correntes são adicionados, as resultantes em F_1 e F_2 serão canceladas para longas distâncias (fig. 3.2b).

Cada condutor de fase é agora substituído por um par de condutores. Isto resulta em uma ampla redução do campo magnético, o qual, para longas distâncias, decai a uma taxa igual a $1/r^3$, em vez de $1/r^2$, que é a taxa de decaimento do campo para a LT trifásica original. Esta observação motiva a realização de uma análise geral para o problema de redução de campos.

3.2.3 Campos magnéticos de dois condutores paralelos

Como um ponto de partida para uma análise geral, estuda-se o campo magnético de duas correntes (fig. 3.3), I_1 e I_2 , localizadas simetricamente em relação ao centro C , nas coordenadas $[x,y]$ e $[-x,-y]$, $x^2+y^2 = a^2$. Elas criam componentes de campo magnético H em um ponto distante F , localizado no eixo x , a uma distância r em relação a C (assume-se que a corrente de retorno está localizada a uma distância muito maior do que r ; ver fig. 3.3). I_1 e I_2 podem representar quantidades instantâneas ou complexas.

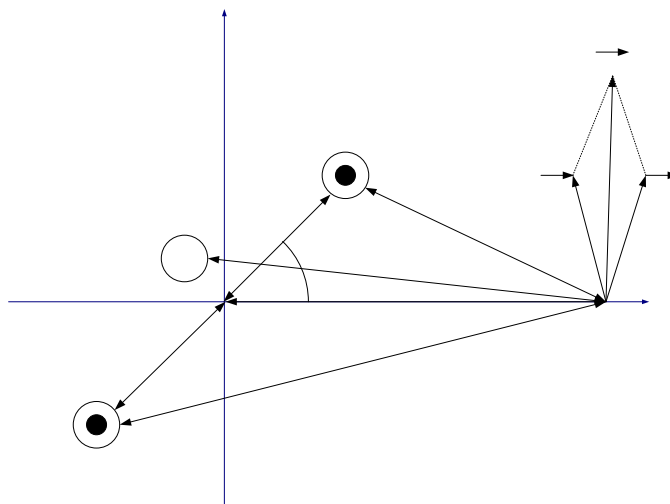


Figura 3.3. Campo magnético de dois condutores paralelos ou antiparalelos. Definição de um condutor substituto.

A corrente I_1 em $[x,y]$ fornece as componentes de campo em F [44]:

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi r_1}; \quad (3.1)$$

$$H_{1x} = \frac{I_1 y}{2\pi r_1^2}; \quad (3.2)$$

$$H_{1y} = \frac{I_1(r-x)}{2\pi r_1^2}; \quad (3.3) \quad \mathbf{a} \quad \mathbf{l}_3$$

onde: $r_1^2 = (r-x)^2 + y^2$;

$$\frac{1}{r_1^2} = \frac{1}{(r-x)^2 + y^2} = \frac{1}{r^2 - 2rx + x^2 + y^2}. \quad \mathbf{a} \quad \mathbf{c} \quad (3.4)$$

Esta equação pode ser expandida em série de potências, fornecendo finalmente[44]:

$[-X,-Y]$

$$\frac{1}{r_1^2} = \frac{1}{r^6} [r^4 + 2r^3x + r^2(3x^2 - y^2) + 4rx(x^2 - y^2) + \dots] \quad (3.5)$$

Expressões correspondentes para a corrente I_2 são obtidas através da substituição de x e y por $-x$ e $-y$, respectivamente. As expressões finais para as componentes de campo devidas as correntes I_1 e I_2 se tornam:

$$H_{1x} = \frac{I_1 y}{2\pi r^4} (r^2 + 2rx + 3x^2 - y^2 + \dots); \quad (3.6)$$

$$H_{1y} = \frac{I_1}{2\pi r^4} [r^3 + r^2x + r(x^2 - y^2) + x(x^2 - 3y^2) + \dots]; \quad (3.7)$$

$$H_{2x} = \frac{I_2(-y)}{2\pi r^4} (r^2 - 2rx + 3x^2 - y^2 + \dots); \quad (3.8)$$

$$H_{2y} = \frac{I_2}{2\pi r^4} [r^3 - r^2x + r(x^2 - y^2) - x(x^2 - 3y^2) + \dots]. \quad (3.9)$$

Estas expressões serão utilizadas para duas finalidades:

- (i) Calcular o campo magnético de um dipolo plano;
- (ii) Definir um condutor hipotético que pode substituir um condutor dividido nos cálculos.

3.2.3.1 Campo magnético de um dipolo plano

Considerando $I_1 = -I_2 \approx I$, obtém-se o campo de um condutor gêmeo (fig. 3.1b, fig. 3.3) [44]:

$$H_{1x} + H_{2x} = \frac{I2y}{2\pi r^4} (r^2 + 3x^2 - y^2 + \dots) \cong \frac{Iy}{\pi r^2}; \quad (3.10)$$

$$H_{1y} + H_{2y} = \frac{I2x}{2\pi r^4} (r^2 + x^2 - 3y^2 + \dots) \cong \frac{Ix}{\pi r^2}; \quad (3.11)$$

$$H_x^2 + H_y^2 \cong \frac{I^2(x^2 + y^2)}{\pi^2 r^4}; \quad (3.12)$$

$$H \cong \frac{Ia}{\pi r^2}; \quad (3.13)$$

$$\frac{H_x}{H_y} \cong \frac{y}{x}. \quad (3.14)$$

Rotacionando o sistema de corrente no sentido horário, em torno de C (reduzindo α na fig. 3.3), o ponto F varrerá o campo em todos os pontos a uma distância r de C . Desta forma, percebe-se que a magnitude da indução magnética é, para uma primeira aproximação, independente da orientação angular dos condutores (equação 3.13). A magnitude decai conforme a relação a/r^2 , onde a é metade da distância entre os condutores.

3.2.3.2 Definição de um condutor substituto para um condutor dividido

Considerando $I_1 = I_2 \approx I$, o sistema de corrente representa um condutor dividido. Deve-se obter a dependência radial do campo magnético e, a partir dela, será calculada a localização de um condutor hipotético, conduzindo a corrente I_3 (fig. 3.3), o qual pode substituir o condutor dividido real nos cálculos.

As condições para o condutor substituto é que ele deve conduzir a corrente $I_3 = 2I$, e deve estar localizado de tal forma que ele forneça o mesmo campo magnético em F , assim como as correntes reais $I_1 + I_2$. Buscam-se as coordenadas x_3 e y_3 de I_3 , como funções de x , y e r . As coordenadas dependem da localização do ponto de campo magnético (ponto F).

Expressões para as componentes de campo magnético devido a I_3 são obtidas por analogia com aquelas para I_1 . Equacionando $H_{1x} + H_{2x} = H_{3x}$, $H_{1y} + H_{2y} = H_{3y}$ e desprezando os termos de ordem superior, tem-se:

$$x_3 \cong \frac{x^2 - y^2}{r}; \quad (3.15)$$

$$y_3 \cong \frac{2xy}{r}; \quad (3.16)$$

$$\frac{y_3}{x_3} \cong \frac{2xy}{x^2 - y^2}. \quad (3.17)$$

O condutor substituto aproxima-se do centro C ao longo de uma linha reta, à medida que o ponto de campo magnético (ponto F) é movido até o infinito. Sua distância de C varia na proporção $1/r$. Observa-se que $x_3 = 0$ se $x = \pm y$, $x_3 < 0$ se $|x| < |y|$, e $y_3 = 0$ se $x = 0$ ou $y = 0$.

A distância a_3 de um condutor substituto em relação a C , é dada por:

$$a_3 = \sqrt{x_3^2 + y_3^2} = \frac{x^2 + y^2}{r} = \frac{a^2}{r}. \quad (3.18)$$

onde a_3 é desta forma menor que a por um fator igual a a/r .

3.2.4 Campo magnético devido a um condutor dividido

Para utilizar o condutor substituto para o cálculo do campo magnético, introduz-se temporariamente uma corrente de retorno fictícia $-2I$ em C . Os dois condutores formam então um par e pode-se usar as equações (3.10) a (3.13) para estimar o campo magnético no ponto de campo magnético F atual, através da substituição $I_3 = 2I$ em vez de I , e $a_3/2$ em vez de a , na equação (3.13):

$$H \cong \frac{2Ia^2}{\pi 2 r^3} = \frac{Ia^2}{\pi r^3}. \quad (3.19)$$

Este sistema de corrente cria um campo magnético que se assemelha ao campo magnético de um dipolo plano, mas decrescendo com a distância do ponto de campo magnético r a uma taxa igual a $1/r^3$, a qual pode ser considerada como um efeito de dois condutores se aproximando quando r é aumentado.

3.2.5 Sistema trifásico geral

No sistema trifásico geral com condutores divididos, tendo um centro comum C (fig. 3.4), trata-se cada fase separadamente, da mesma forma como descrito acima. Durante este processo, serão colocadas as seguintes correntes de retorno fictícias em C :

$$-(2I_R + 2I_S + 2I_T). \quad (3.20)$$

A soma é zero e as correntes podem ser eliminadas. Tem-se então três campos magnéticos superpostos, os quais individualmente decaem a uma taxa igual a $1/r^3$, não existindo nenhum termo igual a $1/r^2$. Eles também estão defasados no tempo, assim como as correntes de fase originais. A soma vetorial instantânea destes campos magnéticos deve então decrescer a uma taxa igual a $1/r^3$, à medida que r tende ao infinito.

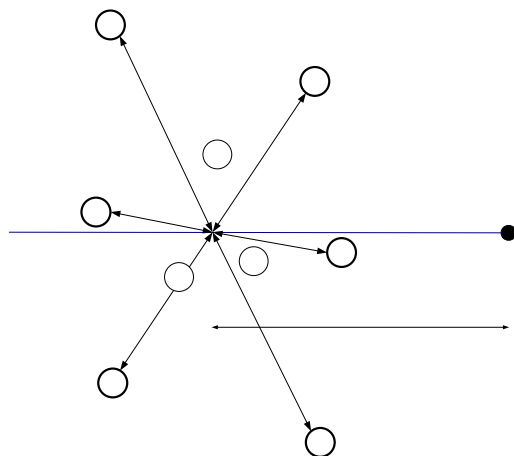


Figura 3.4. Sistema trifásico generalizado com condutores divididos. A localização de condutores substitutos hipotéticos, R' , S' e T' é mostrada em relação ao ponto de campo magnético F , calculado a partir das equações (3.15) e (3.16).

As distâncias de divisão a_R , a_S e a_T , podem ser diferentes, e nenhuma restrição na posição angular α dos condutores reais é necessária.

Conclusão: O efeito principal da divisão de fases é uma alteração na taxa de variação da intensidade da indução magnética, que passa a ser igual a $1/r^3$. Isto será sempre válido, desde que os condutores divididos tenham um mesmo centro.

3.2.6 Aplicações a LTs de potência existentes

As figs. 3.5a e 3.5b mostram exemplos de tipos de LTs de potência existentes, originalmente transportando duas LTs trifásicas separadas.

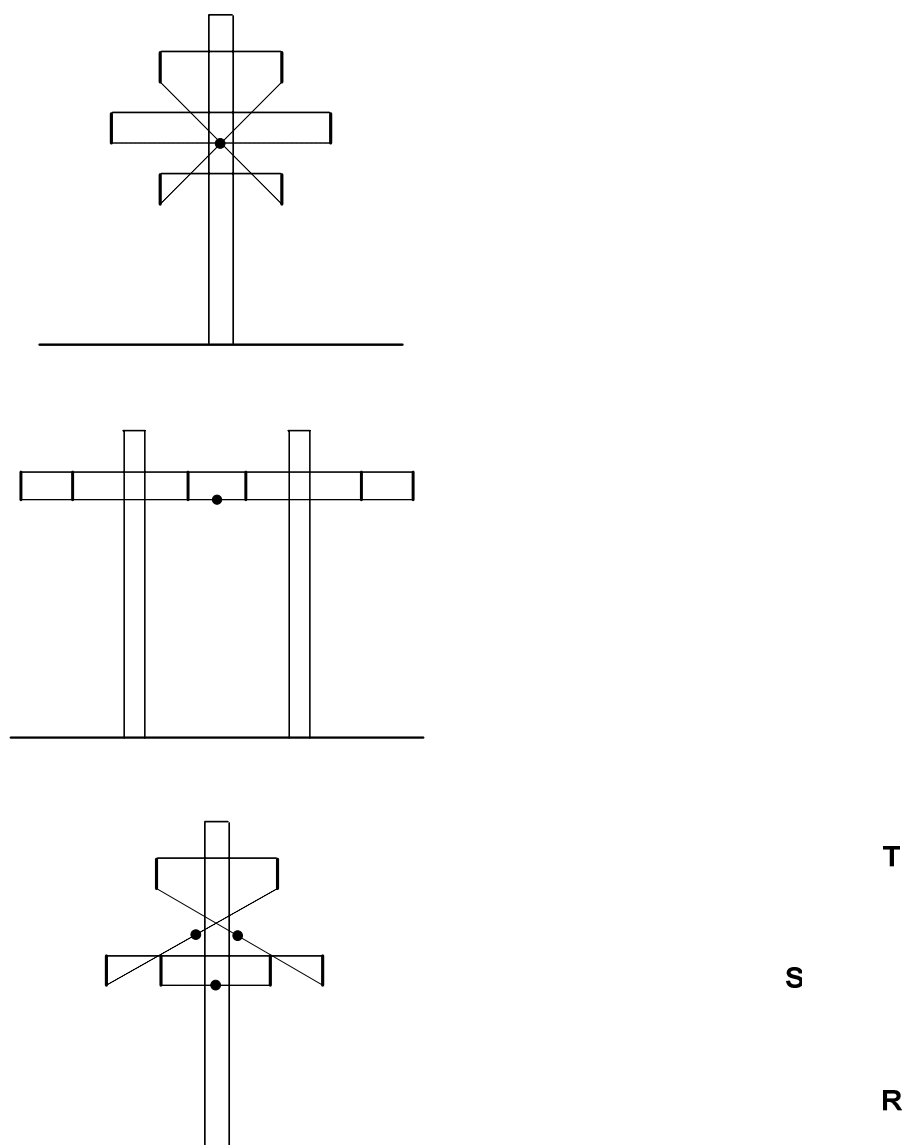


Figura 3.5. Conexão de LTs de potência existentes para redução da intensidade da indução magnética.

- (a) LT trifásica vertical com circuito duplo e centro comum C .
- (b) LT trifásica horizontal com circuito duplo e centro comum C .
- (c) LT trifásica vertical com centros não comuns.

Através da conexão delas em pares, como mostrado pelas linhas pontilhadas, é possível obter uma LT trifásica com condutores divididos tendo um centro comum C .

Em outros casos, como por exemplo, o da fig. 3.5c, os condutores divididos não possuem um centro comum. Isto significa que as correntes de retorno fictícias introduzidas temporariamente, embora a soma delas seja igual a zero (equação (3.20)), não podem ser canceladas. Estas correntes estão localizadas nos centros C_R , C_S e C_T dos três condutores divididos e criam um campo magnético adicional como aquele de uma LT trifásica ordinária com condutores não divididos localizados nos centros fixados. O campo magnético por elas gerado decairá com uma taxa igual a $1/r^2$. O campo magnético resultante é a soma deste campo com os campos dos três condutores divididos, o qual decai a uma taxa igual a $1/r^3$. Somente se as distâncias entre os centros forem pequenas se comparadas com a distância original entre as fases, pode a conexão para condutores divididos resultar em uma redução considerável do campo magnético distante.

Até agora foram discutidas LTs trifásicas Δ acopladas. No caso do acoplamento estrela, a linha (fio) de transporte de corrente de neutro deve estar localizada no centro comum dos condutores de fase divididos, para cancelar a soma das correntes fictícias (equação (3.20)).

O método de divisão de condutores não é limitado a LTs trifásicas, mas pode igualmente ser bem aplicado a sistemas monofásicos, LTs de corrente contínua (DC), cabos, instalações de fontes de potência domésticas e cabos de sinais. A divisão de cada condutor não é limitada a dois condutores. Divisões em três, quatro ou mais fios, localizados concentricamente em torno de um centro, reduzirão a intensidade do campo magnético ainda mais. Para um dos pares de fase, a distância pode ser zero, isto é, seus condutores podem ser substituídos por um condutor no centro, conduzindo a corrente total da fase. No caso especial de uma linha de dois condutores, com um dos condutores localizados no centro, enquanto o outro é dividido em um número infinito de pares de fase, simetricamente localizados, a linha é transformada em um cabo coaxial, que como é sabido, não produz campo magnético externo.

Como um exemplo, as intensidades da indução magnética são calculadas para três condutores (LT trifásica da fig. 3.2a e LT de seis condutores da fig. 3.2b) e ilustradas na fig. 3.6 como funções da distância horizontal do centro C .

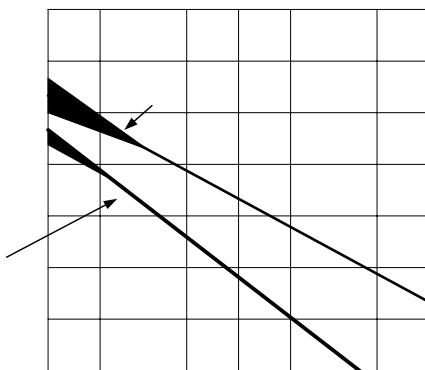


Figura 3.6. Intensidade da indução magnética calculada como função da distância horizontal em relação ao centro C , para uma LT trifásica com três condutores e a mesma LT com condutores divididos.

$$a = 5 \text{ m e } I = 1000 \text{ A.}$$

A altura da LT é definida como sendo menor que 10 m, para levar em conta as partes mais baixas da LT de potência. A difusão (espalhamento) na região de campo magnético próximo depende da localização atual do ponto de campo magnético relativo aos condutores. As propriedades da terra (condutividade e permissividade) não foram levadas em consideração. Observa-se que o campo de uma LT de três condutores decai a uma taxa de $1/r^2$, mas para uma LT de seis condutores, a taxa de decaimento do campo é igual a $1/r^3$.

3.2.7 Conclusões sobre a técnica tipo divisão de condutores

Um método para redução do campo magnético externo distante de condutores elétricos foi estudado e um critério geral e parâmetros de projeto foram deduzidos.

Foi mostrado que a divisão de condutores, em um sistema trifásico, resultará em uma taxa de decaimento na intensidade da indução magnética igual a $1/r^3$, contanto que todos os condutores divididos possuam um centro comum. As distâncias de divisão relativas ao centro, para pares diferentes, não precisam ser as mesmas, e os ângulos entre os planos dos condutores divididos podem ser arbitrários. Um dos condutores de fase pode ser não dividido no centro. Se os condutores não possuem um centro em comum, um campo magnético adicional, decaindo a uma taxa igual a $1/r^2$ será superposto. Este campo adicional é criado como se as correntes de fase estivessem fluindo nos respectivos centros.

Por fim, é relevante lembrar que, devido ao princípio da reciprocidade, a sensibilidade a distúrbios gerados por fontes externas é reduzida pelo mesmo fator que o campo magnético de uma LT é reduzido no ponto onde a fonte do distúrbio está localizada.

3.2.8 Variáveis que afetam os campos magnéticos ELF em LTs de potência

De maneira geral, as variáveis que afetam os campos magnéticos gerados pelas LTs de potência são:

- (i) A magnitude das correntes de fase;

A intensidade da indução magnética é diretamente proporcional à magnitude das correntes de fase.

- (ii) A distância das LTs em relação aos pontos de observação;

A intensidade da indução magnética diminui à medida que a distância em relação às fontes geradoras de campo magnético (correntes de fase) aumenta. A maioria das LTs de potência produz induções magnéticas cujas intensidades decaem através de um fator igual a $1/r^2$, onde r é a distância em relação à linha. Uma taxa de decaimento igual a $1/r^3$ ocorre quando uma configuração do tipo baixa reatância é utilizada. Para que a configuração seja de baixa reatância e a taxa de decaimento da intensidade da indução magnética seja igual a $1/r^3$, as correntes de fase devem ser de mesma magnitude e o arranjo de fases deve ser do tipo reverso (o que corresponde a um arranjo de fases otimizado, ou seja: ABC//abc não é reverso, enquanto ABC//cba é reverso), já que existem dois circuitos trifásicos separados.

- (iii) As configurações dos condutores;

Nos sistemas trifásicos das LTs de potência, tipicamente, cada fase possui um ou um grupo de condutores. No Brasil é muito comum se utilizar dois ou mais condutores por fase na transmissão de energia elétrica. A intensidade da indução magnética ao nível do solo é resultante da superposição das induções magnéticas produzidas pelas correntes de todos os condutores da LT e dependente da distância entre o ponto de cálculo (ponto de campo magnético) e cada condutor percorrido por corrente elétrica.

- (iv) As correntes de terra resultantes do desbalanceamento das correntes de fase.

Nos sistemas de transmissão desbalanceados, a corrente de retorno fluirá através da terra. De maneira geral, quanto maior for o nível de desbalanceamento das correntes de transmissão, maior será a intensidade da corrente de terra e, conseqüentemente, maior será a intensidade da indução magnética gerada pelo sistema. Com o desbalanceamento das correntes, o nível de cancelamento entre os campos magnéticos gerados por cada condutor diminui, e assim, a indução magnética resultante aumenta.

3.2.9 Princípios para a redução de campos magnéticos ELF gerados por LTs de potência

As LTs de energia elétrica podem ser projetadas com o intuito de reduzir a intensidade das induções magnéticas produzidas. A opção de projeto pode incluir um ou uma combinação dos seguintes critérios:

- (i) Aumento da altura da LT de potência em relação ao solo;
- (ii) Redução do espaço existente entre os condutores através da compactação dos condutores da LT;
- (iii) Redução da corrente de terra através do balanceamento das correntes de fase;
- (iv) Otimização do arranjo de fases da LT.

Se estes critérios forem seguidos, se conseguirá um grande cancelamento dos campos magnéticos e desta forma, a intensidade da indução magnética gerada pela LT ao nível do solo será bastante reduzida.

3.2.10 Aplicação dos princípios para redução de campos magnéticos ELF em LTs de potência

Nesta seção, todos os critérios para a redução da intensidade da indução magnética que foram discutidos anteriormente serão simulados para as topologias de LTs de potência estudadas (horizontal, vertical, delta, delta invertido, delta especial I, delta especial II, horizontal circuito duplo, vertical circuito duplo). Será observada a influência desses

critérios na intensidade da indução magnética gerada pelas LTs estudadas. É analisado o efeito do acréscimo na altura das LTs, o efeito da compactação dos condutores das LTs, o efeito do desbalanceamento das correntes de fase das LTs e por fim, o efeito da otimização do arranjo de fases das LTs. No final, faz-se uma análise das opções de projeto das LTs procurando evidenciar a eficácia de cada opção, bem como o custo para implantação de cada uma delas.

As tabelas que seguem mostram a variação nos níveis máximos da indução magnética produzida para diversas configurações de LTs em função da variação de diversos parâmetros (altura, compactação, desbalanceamento de correntes, etc).

Tabela 3.1. Efeito do acréscimo na altura da LT.

Topologia da LT	h	B_r (μT)
Horizontal	h = 12m	5,6
	h + 1m (+8,3 %)	4,7 (-16,1 %)
	h + 2m (+14,0 %)	4,1 (-26,8 %)
Vertical	h = 12m	4,3
	h + 1m (+8,3 %)	3,7 (-14,0 %)
	h + 2m (+14,0 %)	3,2 (-25,6 %)
Delta	h = 12m	3,7
	h + 1m (+8,3 %)	3,1 (-16,2 %)
	h + 2m (+14,0 %)	2,7 (-27,0 %)
Delta invertido	h = 12m	3,3
	h + 1m (+8,3 %)	2,8 (-15,2 %)
	h + 2m (+14,0 %)	2,5 (-24,3 %)
Delta especial I	h = 12m	3,5
	h + 1m (+8,3 %)	3,0 (-14,3 %)
	h + 2m (+14,0 %)	2,6 (-25,7 %)
Delta especial II	h = 12m	3,5
	h + 1m (+8,3 %)	3,0 (-14,3 %)
	h + 2m (+14,0 %)	2,6 (-25,7 %)
Horizontal circuito duplo	h = 12m	4,6
	h + 1m (+8,3 %)	3,9 (-15,2 %)
	h + 2m (+14,0 %)	3,4 (-26,1 %)
Vertical circuito duplo	h = 12m	4,1
	h + 1m (+8,3 %)	3,5 (-14,6 %)
	h + 2m (+14,0 %)	3,0 (-22,0 %)

Conclusão: De maneira geral, observa-se que um acréscimo de 1 m na altura mínima das LTs proporcionou uma redução de aproximadamente 15 % na intensidade máxima da indução magnética. A topologia que se mostrou mais eficiente para este acréscimo de altura foi a delta, com redução de 16,2 %. Um acréscimo de 2 m na altura mínima das LTs proporcionou uma redução de aproximadamente 25 % na intensidade máxima da indução magnética. Mais uma vez, a topologia delta se mostrou a mais eficiente para este acréscimo de altura. Neste caso, a redução foi de 27 %.

Tabela 3.2. Efeito da compactação dos condutores da LT.

Topologia da LT	Compactação (%)	B_r (μ T)
Horizontal	0	5,6
	10	5,1 (-8,9 %)
	20	4,6 (-17,6 %)
Vertical	0	4,3
	10	4,0 (-7,0 %)
	20	3,6 (-16,3 %)
Delta	0	3,7
	10	3,3 (-10,8 %)
	20	3,1 (-16,2 %)
Delta invertido	0	3,3
	10	3,1 (-6,1 %)
	20	2,8 (-15,2 %)
Delta especial I	0	3,5
	10	3,0 (-14,3 %)
	20	2,8 (-20,0 %)
Delta especial II	0	3,5
	10	3,2 (-8,6 %)
	20	2,9 (-17,2 %)
Horizontal circuito duplo	0	4,6
	10	4,2 (-8,7 %)
	20	3,8 (-17,4 %)
Vertical circuito duplo	0	4,1
	10	3,8 (-7,3 %)
	20	3,5 (-14,6 %)

Conclusão: Para 10 % de compactação nas LTs estudadas, a redução na intensidade máxima da indução magnética variou numa faixa que vai de 6 % a 15 %, aproximadamente. Para este valor percentual de compactação, a topologia que se mostrou mais eficiente foi a delta especial I, com redução de 14,3 %. Para 20 % de compactação nas LTs estudadas, a redução na intensidade máxima da indução magnética variou numa faixa que vai de 15 % a 20 %, aproximadamente. Para este valor percentual de compactação, mais uma vez, a topologia que se mostrou mais eficiente foi a delta especial I, com redução de 20 %.

Tabela 3.3. Efeito do desbalanceamento das correntes de fase da LT.

Topologia da LT	Desbalanceamento (%)	B_r (μ T)
Horizontal	Sistema balanceado	5,6
	$I_1 + 10$ %	6,0 (+7,2 %)
	$I_1 + 20$ %	7,0 (+25,0 %)
	$I_2 + 10$ %	6,1 (+8,9 %)
	$I_2 + 20$ %	7,1 (+26,8 %)
	$I_3 + 10$ %	6,1 (+8,9 %)
	$I_3 + 20$ %	7,2 (+28,6 %)

Vertical	Sistema balanceado	4,3
	I ₁ + 10 %	3,3 (-23,3 %)
	I ₁ + 20 %	2,5 (-41,9 %)
	I ₂ + 10 %	4,4 (+2,3 %)
	I ₂ + 20 %	5,1 (+18,6 %)
	I ₃ + 10 %	6,0 (+39,5 %)
	I ₃ + 20 %	7,7 (+79,1 %)
Delta	Sistema balanceado	3,7
	I ₁ + 10 %	4,7 (+27,0 %)
	I ₁ + 20 %	6,0 (+62,2 %)
	I ₂ + 10 %	3,0 (-18,9 %)
	I ₂ + 20 %	3,0 (-18,9 %)
	I ₃ + 10 %	4,7 (+27,0 %)
Delta invertido	Sistema balanceado	3,3
	I ₁ + 10 %	3,2 (-3,0 %)
	I ₁ + 20 %	3,7 (+12,1 %)
	I ₂ + 10 %	3,2 (-3,0 %)
	I ₂ + 20 %	4,0 (+21,2 %)
	I ₃ + 10 %	5,0 (+51,5 %)
Delta especial I	Sistema balanceado	3,5
	I ₁ + 10 %	2,9 (-17,1 %)
	I ₁ + 20 %	3,1 (-11,4 %)
	I ₂ + 10 %	4,1 (+17,1 %)
	I ₂ + 20 %	5,2 (+48,6 %)
	I ₃ + 10 %	4,7 (+34,3 %)
Delta especial II	Sistema balanceado	3,5
	I ₁ + 10 %	2,9 (-17,2 %)
	I ₁ + 20 %	3,2 (-8,6 %)
	I ₂ + 10 %	4,8 (+37,2 %)
	I ₂ + 20 %	6,5 (+85,7 %)
	I ₃ + 10 %	3,9 (+11,4 %)
Horizontal circuito duplo	Sistema balanceado	4,6
	I ₁ + 10 %	4,7 (+2,2 %)
	I ₁ + 20 %	4,9 (+6,5 %)
	I ₂ + 10 %	4,7 (+2,2 %)
	I ₂ + 20 %	5,0 (+8,7 %)
	I ₃ + 10 %	4,7 (+2,2 %)
	I ₃ + 20 %	5,0 (+8,7 %)
	I ₄ + 10 %	4,8 (+4,4 %)
	I ₄ + 20 %	5,1 (+10,9 %)
	I ₅ + 10 %	4,8 (+4,4 %)
	I ₅ + 20 %	5,1 (+10,9 %)
I ₆ + 10 %	4,8 (+4,4 %)	

	I ₆ + 20 %	5,2 (+13,1 %)
Vertical circuito duplo	Sistema balanceado	4,1
	I ₁ + 10 %	3,6 (-12,2 %)
	I ₁ + 20 %	3,1 (-24,4 %)
	I ₂ + 10 %	4,1 (+0,0 %)
	I ₂ + 20 %	4,3 (+4,9 %)
	I ₃ + 10 %	4,9 (+19,5 %)
	I ₃ + 20 %	5,8 (+41,5 %)
	I ₄ + 10 %	3,6 (-12,2 %)
	I ₄ + 20 %	3,1 (-24,4 %)
	I ₅ + 10 %	4,1 (+0,0 %)
	I ₅ + 20 %	4,3 (+4,9 %)
	I ₆ + 10 %	5,0 (+22,0 %)
	I ₆ + 20 %	5,8 (+41,5 %)

Conclusão: A literatura freqüentemente informa que um desequilíbrio nas fases proporciona um aumento na intensidade da indução magnética. Deve-se tomar muita cautela ao se fazer esta afirmação. Para LTs trifásicas equilibradas (em circuito simples ou circuito duplo sem arranjo de fases), a taxa de decaimento da indução magnética em função da distância é igual a $1/r^2$. À medida que o sistema trifásico vai ficando desequilibrado, esta taxa de decaimento vai sendo alterada, podendo ser igual a $1/r$, caso o desequilíbrio seja elevado. Se a LT em questão for equilibrada e do tipo circuito trifásico duplo com arranjo de fases otimizado (configuração de baixa reatância), a taxa de decaimento da indução magnética em função da distância é igual a $1/r^3$. Se esta LT entrar em desequilíbrio, a taxa de decaimento pode passar para $1/r^2$ ou $1/r$, dependendo da intensidade do desequilíbrio. Desta forma, a intensidade da indução magnética depende do condutor afetado e do ponto de campo magnético analisado. O campo magnético próximo pode ter sua intensidade aumentada, inalterada ou até mesmo, diminuída, porém, o campo magnético distante tem sua intensidade sempre aumentada à medida que o sistema entra em desequilíbrio.

Tabela 3.4. Efeito da otimização do arranjo de fases da LT.

Topologia da LT	Configuração de fase	B _r (μT)
Horizontal	Circuito simples	5,6
	ABC//abc (não otimizado)	4,6
	ABC//cba (otimizado)	1,2 (-74,0 %)
Vertical	Circuito simples	4,3
	ABC//abc (não otimizado)	4,1
	ABC//cba (otimizado)	1,1 (-73,2 %)

A fig. 3.7 mostra os valores de indução magnética (circuito duplo horizontal) calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma linha equilibrada com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m e $D = 3$ m, e percorridos por correntes de 500 A.

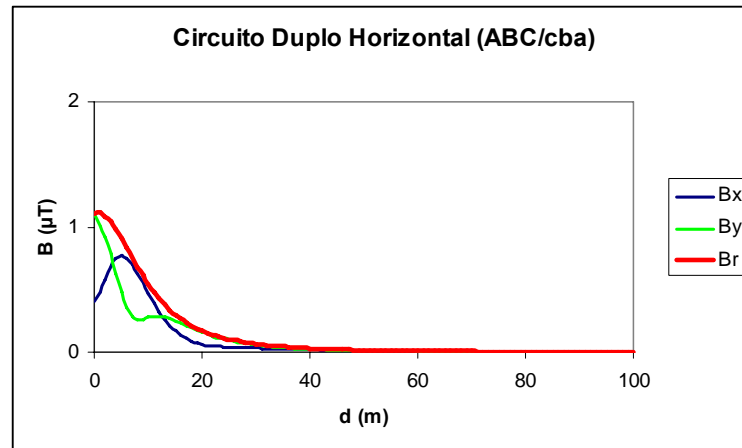


Figura 3.7. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 500\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 500\angle -120^\circ A$, $\dot{I}_4 = 500\angle -120^\circ A$, $\dot{I}_5 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_6 = 500\angle 0^\circ A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

A fig. 3.8 mostra os valores de indução magnética (circuito duplo vertical) calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma linha equilibrada com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m e $D = 3$ m, e percorridos por correntes de 500 A.

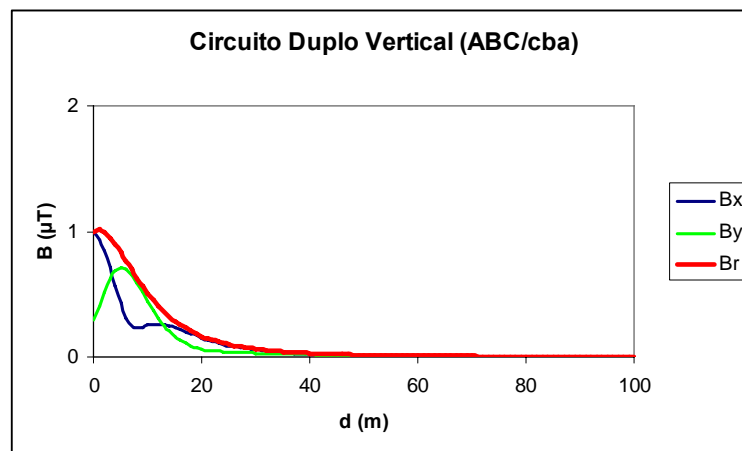


Figura 3.8. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 500\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 500\angle -120^\circ A$, $\dot{I}_4 = 500\angle -120^\circ A$, $\dot{I}_5 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_6 = 500\angle 0^\circ A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Em ambos os casos verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da LT.

Conclusão: Através da análise aqui realizada percebeu-se que com a implantação do arranjo de fases otimizado (ABC//cba) a redução percentual na intensidade máxima da indução magnética chegou a aproximadamente 75 % em relação ao arranjo de fases não otimizado (ABC//abc).

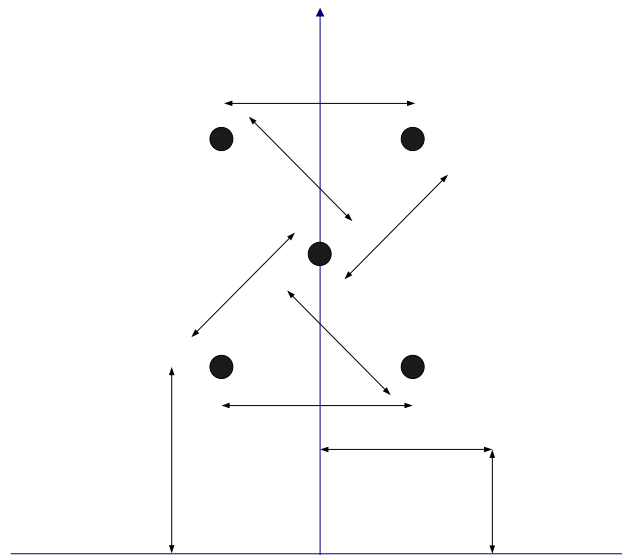
Tabela 3.5. Avaliação das opções de projeto.

Opção de projeto	Custo (%)	Comentários
Aumento na altura da LT em relação ao solo.	$\approx + 15$	Esta técnica é mais indicada para novas construções.
Compactação dos condutores.	$\approx - 20$	Esta técnica é mais indicada para novas construções.
Balanceamento das correntes de fase.	$\approx + 5$	Esta técnica é indicada para LTs já existentes ou novas construções, sendo muito eficiente na redução da intensidade da indução magnética, com o mínimo custo envolvido.
Otimização do arranjo de fases.	$\approx + 90$	Esta técnica é muito eficiente na redução da intensidade da indução magnética, mas seu custo é elevado.

3.2.11 Divisão de condutores para a topologia delta

3.2.11.1 Caso Δ Split (a)

Inicialmente será considerado o caso de uma LT trifásica composta de cinco condutores paralelos com uma distância mínima d entre fases e altura mínima h em relação ao solo, como mostra a fig. 3.9. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, nos condutores periféricos as magnitudes destas são idênticas e iguais à metade da corrente do condutor central.

Figura 3.9. LT trifásica delta com condutores divididos Δ Split (a).

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

- (i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{xP} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{aligned} & \frac{(\sqrt{3}d+h-y_P)\dot{I}_1}{(x_P+\frac{d}{2})^2+(\sqrt{3}d+h-y_P)^2} + \frac{(\sqrt{3}d+h-y_P)\dot{I}_2}{(x_P-\frac{d}{2})^2+(\sqrt{3}d+h-y_P)^2} + \frac{(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_P)\dot{I}_3}{x_P^2+(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_P)^2} + \\ & \frac{(h-y_P)\dot{I}_4}{(x_P-\frac{d}{2})^2+(h-y_P)^2} + \frac{(h-y_P)\dot{I}_5}{(x_P+\frac{d}{2})^2+(h-y_P)^2} \end{aligned} \right]; \quad (3.21)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P:

$$\dot{B}_{yP} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{aligned} & \frac{(x_P+\frac{d}{2})\dot{I}_1}{(x_P+\frac{d}{2})^2+(\sqrt{3}d+h-y_P)^2} + \frac{(x_P-\frac{d}{2})\dot{I}_2}{(x_P-\frac{d}{2})^2+(\sqrt{3}d+h-y_P)^2} + \frac{x_P\dot{I}_3}{x_P^2+(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_P)^2} + \\ & \frac{(x_P-\frac{d}{2})\dot{I}_4}{(x_P-\frac{d}{2})^2+(h-y_P)^2} + \frac{(x_P+\frac{d}{2})\dot{I}_5}{(x_P+\frac{d}{2})^2+(h-y_P)^2} \end{aligned} \right]. \quad (3.22)$$

A fig. 3.10 mostra os valores de indução magnética (circuito delta split A) calculados a uma altura de 1 m a partir do solo com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por uma distância mínima de 2 m, e percorridos por correntes de 500 A (condutores periféricos) e 1000 A (condutor central).

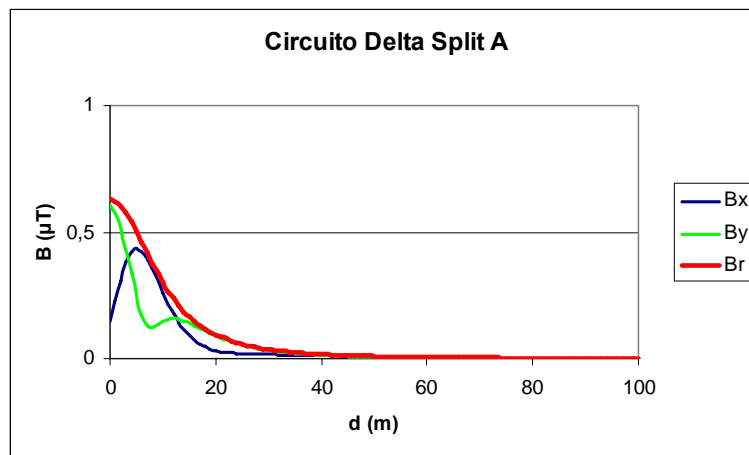


Figura 3.10. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 500\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000\angle -120^\circ A$, $\dot{I}_4 = 500\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_5 = 500\angle 120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

3.2.11.2 Caso Δ Split (b)

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de cinco condutores paralelos com uma distância mínima d entre fases e altura mínima h em relação ao solo, como mostra a fig. 3.11. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, nos condutores periféricos as magnitudes destas são idênticas e iguais à metade da corrente do condutor central.

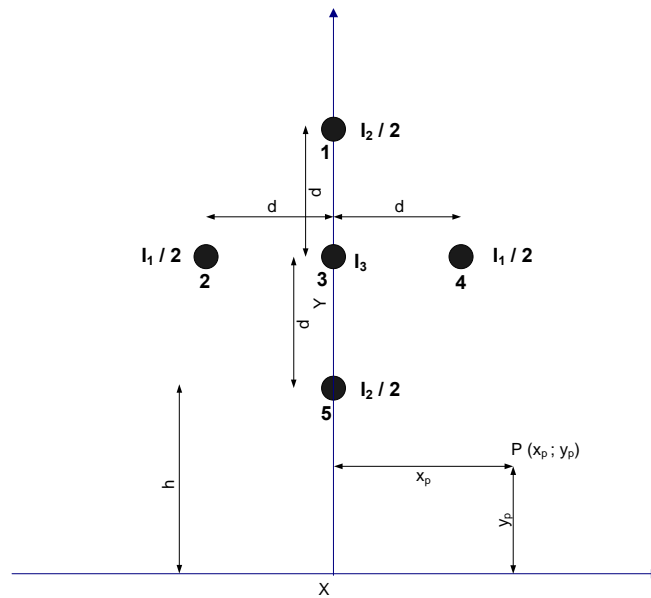


Figura 3.11. LT trifásica delta com condutores divididos Δ Split (b).

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

(i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{Xp} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(2d+h-y_p)\dot{I}_1}{x_p^2 + (2d+h-y_p)^2} + \frac{(d+h-y_p)\dot{I}_2}{(x_p+d)^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{(d+h-y_p)\dot{I}_3}{x_p^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{(d+h-y_p)\dot{I}_4}{(x_p-d)^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{(h-y_p)\dot{I}_5}{x_p^2 + (h-y_p)^2} \right]; \quad (3.23)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P :

$$\dot{B}_{Yp} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{x_p\dot{I}_1}{x_p^2 + (2d+h-y_p)^2} + \frac{(x_p+d)\dot{I}_2}{(x_p+d)^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{x_p\dot{I}_3}{x_p^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{(x_p-d)\dot{I}_4}{(x_p-d)^2 + (d+h-y_p)^2} + \frac{x_p\dot{I}_5}{x_p^2 + (h-y_p)^2} \right]. \quad (3.24)$$

A fig. 3.12 mostra os valores de indução magnética (circuito delta split B) calculados a uma altura de 1 m a partir do solo com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por uma distância mínima de 2 m, e percorridos por correntes de 500 A (condutores periféricos) e 1000 A (condutor central).

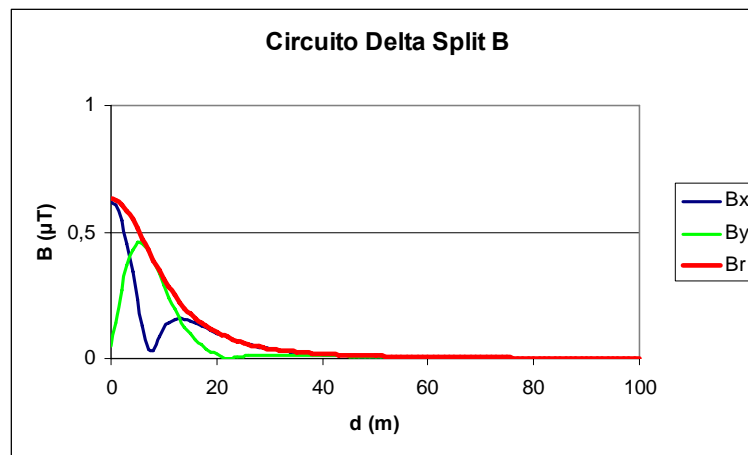


Figura 3.12. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 500\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 1000\angle -120^\circ A$, $\dot{I}_4 = 500\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_5 = 500\angle 0^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

3.2.11.3 Caso Δ Split (c)

Aqui, tem-se uma LT trifásica composta de sete condutores paralelos com uma distância mínima d entre fases e altura mínima h em relação ao solo, como mostra a fig. 3.13. As correntes que fluem nos condutores estão defasadas de 120° e, nos condutores periféricos as magnitudes destas são idênticas e iguais a um terço da corrente do condutor central.

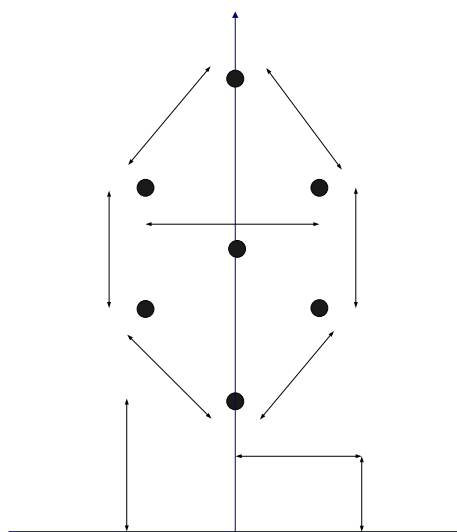


Figura 3.13. LT trifásica delta com condutores divididos Δ Split (c).

As componentes da indução magnética no ponto P são calculadas conforme abaixo:

(i) Componente fasorial horizontal da indução magnética no ponto P:

$$\dot{B}_{X_P} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{aligned} & \frac{((1+\frac{\sqrt{3}}{2})d+h-y_P)\dot{I}_1}{(x_P+\frac{d}{2})^2+(1+\frac{\sqrt{3}}{2})d+h-y_P)^2} + \frac{((1+\sqrt{3})d+h-y_P)\dot{I}_2}{x_P^2+(1+\sqrt{3})d+h-y_P)^2} + \frac{((1+\frac{\sqrt{3}}{2})d+h-y_P)\dot{I}_3}{(x_P-\frac{d}{2})^2+(1+\frac{\sqrt{3}}{2})d+h-y_P)^2} + \\ & \frac{(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_P)\dot{I}_4}{(x_P-\frac{d}{2})^2+(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_P)^2} + \frac{(h-y_P)\dot{I}_5}{x_P^2+(h-y_P)^2} + \frac{(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_P)\dot{I}_6}{(x_P+\frac{d}{2})^2+(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_P)^2} + \\ & \frac{((\frac{1+\sqrt{3}}{2})d+h-y_P)\dot{I}_7}{x_P^2+(\frac{1+\sqrt{3}}{2})d+h-y_P)^2} \end{aligned} \right]; \quad (3.25)$$

(ii) Componente fasorial vertical da indução magnética no ponto P:

$$\dot{B}_{Y_P} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{aligned} & \frac{(x_P+\frac{d}{2})\dot{I}_1}{(x_P+\frac{d}{2})^2+(1+\frac{\sqrt{3}}{2})d+h-y_P)^2} + \frac{x_P\dot{I}_2}{x_P^2+(1+\sqrt{3})d+h-y_P)^2} + \frac{(x_P-\frac{d}{2})\dot{I}_3}{(x_P-\frac{d}{2})^2+(1+\frac{\sqrt{3}}{2})d+h-y_P)^2} + \\ & \frac{(x_P-\frac{d}{2})\dot{I}_4}{(x_P-\frac{d}{2})^2+(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_P)^2} + \frac{x_P\dot{I}_5}{x_P^2+(h-y_P)^2} + \frac{(x_P+\frac{d}{2})\dot{I}_6}{(x_P+\frac{d}{2})^2+(\frac{\sqrt{3}}{2}d+h-y_P)^2} + \\ & \frac{x_P\dot{I}_7}{x_P^2+(\frac{1+\sqrt{3}}{2})d+h-y_P)^2} \end{aligned} \right]. \quad (3.26)$$

A fig. 3.14 mostra os valores de indução magnética (circuito delta split C) calculados a uma altura de 1 m a partir do solo com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por uma distância mínima de 2 m, e percorridos por correntes de 333,3 A (condutores periféricos) e 1000 A (condutor central).

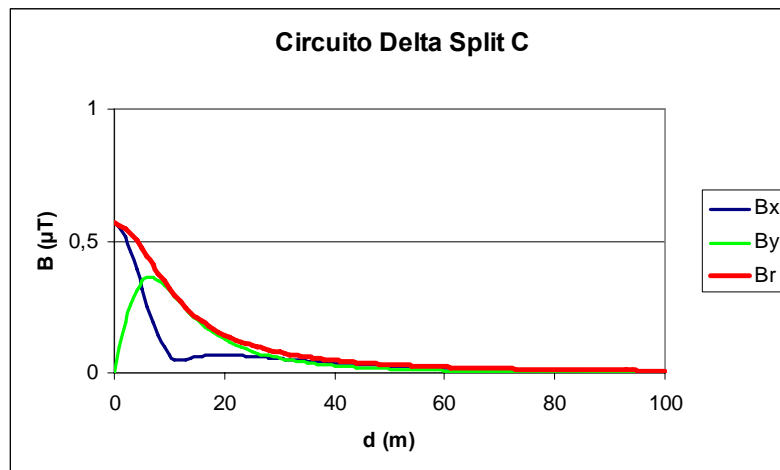


Figura 3.14. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 333,3\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 333,3\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_3 = 333,3\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_4 = 333,3\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_5 = 333,3\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_6 = 333,3\angle 120^\circ A$, $\dot{I}_7 = 1000\angle -120^\circ A$, $h = 12$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Nos três exemplos mostrados, observa-se que os valores máximos de indução são bem menores do que nos casos sem divisão de condutores, comprovando que esta técnica permite uma redução significativa nos valores de campo gerados.

3.2.12 Aplicação dos princípios para redução de campos magnéticos ELF em LTs de potência para os casos Δ Split

Nesta seção serão aplicados os princípios para redução de campos magnéticos ELF gerados por LTs de potência aos casos Δ Split vistos anteriormente. É analisado o efeito do acréscimo na altura da LT, o efeito da compactação dos condutores e o efeito do desbalanceamento das correntes de fase. Todos os casos Δ Split (a,b e c) tem como origem, o circuito trifásico original delta. Neste caso, as correntes originais para a topologia delta são: $\dot{I}_1 = 1000\angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 1000\angle 120^\circ A$ e $\dot{I}_3 = 1000\angle -120^\circ A$. A altura mínima h em relação ao solo é igual a 12 m, a distância mínima d entre os condutores é igual a 2 m e a altura de medida em relação ao solo (y_p) é igual a 1 m. O valor máximo da indução magnética para esta condição é igual a 3,7 μ T, como visto anteriormente.

Tabela 3.6. Efeito do acréscimo da altura da LT.

Topologia da LT	h	B_r (μ T)
Δ Split (a)	h = 12m	0,7
	h + 1m (+8,3 %)	0,5 (-28,6 %)
	h + 2m (+14,0 %)	0,4 (-42,9 %)
Δ Split (b)	h = 12m	0,7
	h + 1m (+8,3 %)	0,5 (-28,6 %)
	h + 2m (+14,0 %)	0,4 (-42,9 %)
Δ Split (c)	h = 12m	0,6
	h + 1m (+8,3 %)	0,5 (-16,7 %)
	h + 2m (+14,0 %)	0,4 (-33,3 %)

Conclusão: Verifica-se que as topologias mais sensíveis ao acréscimo na altura da LT são Δ Split(a) e Δ Split(b). Percebe-se que para 1 m de acréscimo na altura mínima destas topologias, a intensidade da máxima indução magnética teve uma redução de aproximadamente 30 % e, para um acréscimo de 2 m, uma redução aproximada de 45 %. A topologia Δ Split(c) apresentou uma redução aproximada de 17 % na intensidade máxima da indução magnética para um acréscimo de 1 m na altura mínima, e uma redução de aproximadamente 35 % para um acréscimo de 2 m.

Tabela 3.7. Efeito da compactação dos condutores da LT.

Topologia da LT	Compactação (%)	B_r (μ T)
Δ Split (a)	0	0,7
	10	0,5 (-28,6 %)
	20	0,4 (-42,9 %)
Δ Split (b)	0	0,7
	10	0,5 (-28,6 %)
	20	0,4 (-42,9 %)
Δ Split (c)	0	0,6
	10	0,5 (-16,7 %)
	20	0,4 (-33,3 %)

Conclusão: Percebe-se que as topologias mais sensíveis à compactação da LT são Δ Split(a) e Δ Split(b). Observa-se que para 10 % de compactação destas topologias, a intensidade da máxima indução magnética teve uma redução de aproximadamente 30 % e, para compactação de 20 %, uma redução aproximada de 45 %. A topologia Δ Split(c) apresentou uma redução aproximada de 17 % na intensidade máxima da indução magnética para compactação de 10 %, e redução de aproximadamente 35 % para compactação de 20 %.

Tabela 3.8. Efeito do desbalanceamento das correntes de fase da LT.

Topologia da LT	Desbalanceamento (%)	B_r (μ T)
Δ Split (a)	Sistema balanceado	0,7
	$I_1 + 10$ %	1,1 (+57,2 %)
	$I_1 + 20$ %	1,7 (+142,9 %)
	$I_2 + 10$ %	0,9 (+28,6 %)
	$I_2 + 20$ %	1,5 (+114,3 %)
	$I_3 + 10$ %	1,5 (+114,3 %)
	$I_3 + 20$ %	3,0 (+328,6 %)
	$I_4 + 10$ %	1,3 (+85,7 %)
	$I_4 + 20$ %	2,2 (+214,3 %)
	$I_5 + 10$ %	1,2 (+71,4 %)
	$I_5 + 20$ %	2,0 (+185,7 %)

Δ Split (b)	Sistema balanceado	0,7
	I ₁ + 10 %	1,3 (+85,7 %)
	I ₁ + 20 %	2,0 (+185,7 %)
	I ₂ + 10 %	0,6 (-14,3 %)
	I ₂ + 20 %	1,1 (+57,2 %)
	I ₃ + 10 %	1,7 (+142,9 %)
	I ₃ + 20 %	3,1 (+342,9 %)
	I ₄ + 10 %	0,7 (+0,0 %)
	I ₄ + 20 %	1,3 (+85,7 %)
	I ₅ + 10 %	1,5 (+114,3 %)
	I ₅ + 20 %	2,4 (+242,9 %)
Δ Split (c)	Sistema balanceado	0,6
	I ₁ + 10 %	1,0 (+66,7 %)
	I ₁ + 20 %	1,5 (+150,0 %)
	I ₂ + 10 %	0,4 (-33,3 %)
	I ₂ + 20 %	0,6 (+0,0 %)
	I ₃ + 10 %	1,0 (+66,7 %)
	I ₃ + 20 %	1,5 (+150,0 %)
	I ₄ + 10 %	0,5 (-16,7 %)
	I ₄ + 20 %	0,8 (+33,3 %)
	I ₅ + 10 %	1,2 (+100,0 %)
	I ₅ + 20 %	1,8 (+200,0 %)
	I ₆ + 10 %	0,5 (-16,7 %)
	I ₆ + 20 %	0,8 (+33,3 %)
	I ₇ + 10 %	1,4 (+133,3 %)
I ₇ + 20 %	2,8 (+366,7 %)	

Conclusão: Percebe-se através dos resultados que as topologias com condutores divididos são muito mais sensíveis aos desbalanceamentos das correntes de fase do que as topologias estudadas anteriormente. Em geral, os condutores que mais afetam a intensidade da indução magnética em função de desbalanceamentos de corrente, são os que transportam mais corrente e aqueles que estão mais próximos do solo. A sensibilidade destas topologias ao desbalanceamento das correntes de fase é maior porque existem mais componentes de corrente no espaço sofrendo variações em suas intensidades.

3.2.13 Redução do campo magnético através da utilização de LTs de ordem de fase superior (LTs polifásicas)

As LTs polifásicas foram originalmente desenvolvidas para transferirem mais potência em um espaço de transmissão menor. LTs de potência utilizando 6 e 12 fases, respectivamente, têm sido utilizadas para o transporte de energia elétrica. Um sistema hexafásico (6 fases) pode ser obtido através de um transformador com o primário em delta (Δ – sistema trifásico a 3 fios) e dois secundários, sendo um em Δ (secundário 1 ou $S1$) e o outro em Y (secundário 2 ou $S2$). Desta forma, tem-se 6 fases com tensões defasadas de 60° entre si. Se a relação de transformação do primário para o $S1$ e do primário para o $S2$ forem adequadas (necessariamente diferentes entre si), é possível a obtenção de tensões de linha iguais entre si e iguais a um dado valor (iguais à tensão de linha do sistema trifásico,

por exemplo). Desta forma, a potência aparente total do sistema hexafásico será igual à potência aparente do sistema trifásico, se as correntes de linha do sistema hexafásico forem iguais à metade das correntes de linha do sistema trifásico (este comentário é válido para sistemas simétricos e equilibrados).

Muitos autores defendem a teoria de que as LTs polifásicas são eficazes na redução da intensidade da indução magnética. No trabalho desenvolvido por Stewart et al. [45], são feitas comparações entre LTs polifásicas e trifásicas. Para uma potência de transmissão aparente igual a 1625 MVA, são feitas comparações entre uma LT de 12 fases ($V_{\text{fase-fase}} = 138 \text{ kV}$) e uma LT trifásica ($V_{\text{fase-fase}} = 345 \text{ kV}$). Aparentemente, a LT de 12 fases produz uma indução magnética ao nível do solo menor que aquelas produzidas pelas configurações de LTs trifásicas apresentadas (horizontal, vertical, delta e delta invertido). As diferenças existentes são muito sutis e deve-se tomar muito cuidado com relação às comparações que podem ser feitas. Não fica bem claro para o leitor se as LTs trifásicas estão no mesmo nível de compactação da LT de 12 fases e se esta é a razão pela qual a intensidade da indução magnética produzida pela LT polifásica é menor. Uma análise mais cuidadosa mostra que deve-se observar o campo magnético próximo e o campo magnético distante produzido por cada uma das configurações, sejam elas LTs trifásicas (circuito simples, duplo circuito sem arranjo de fases otimizado ou duplo circuito com arranjo de fases otimizado) ou polifásicas (6 ou 12 fases). A fig. 3.15 ilustra uma comparação entre uma LT de 12 fases e uma LT de circuito duplo com arranjo de fases otimizado. Neste caso faz-se com que a LT de 12 fases ocupe o mesmo espaço que a LT trifásica de circuito duplo com arranjo de fases otimizado (sabe-se que normalmente a LT de 12 fases ocupa um espaço de transmissão bem menor que o espaço ocupado pela LT trifásica). São analisados os condutores mais altos em relação ao solo (condutores a uma mesma altura) para as duas configurações de LTs.

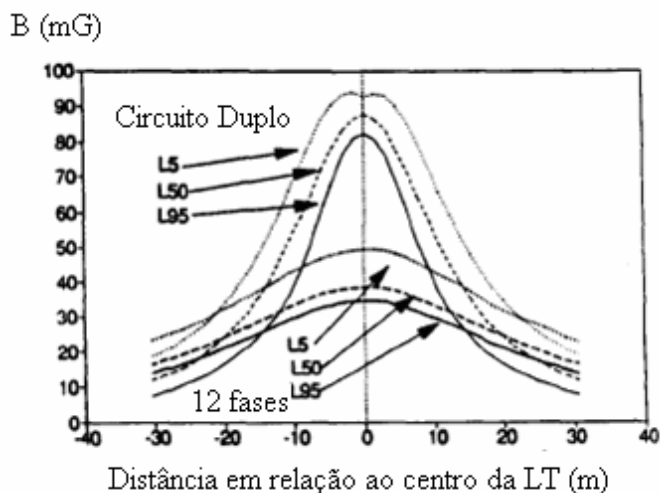


Figura 3.15. Comparação entre as induções magnéticas produzidas pelos condutores mais altos (mesma altura em relação ao solo) de uma LT polifásica (12 fases) e uma LT trifásica de circuito duplo com arranjo de fases otimizado [21]

Percebe-se que o campo magnético próximo produzido pela LT de circuito duplo é mais intenso que aquele produzido pela LT de 12 fases. No entanto, à medida que a distância em relação ao centro da LT vai aumentando, a intensidade da indução magnética produzida pela LT de 12 fases passa a ser maior que a produzida pela LT de circuito duplo.

Conclui-se então que o campo magnético distante da LT de 12 fases é mais intenso que aquele produzido pela LT de circuito duplo.

Existem alguns pesquisadores que discordam da opinião que diz que as LTs polifásicas reduzem a intensidade da indução magnética. Dentre eles, destaca-se Zaffanella [46], que afirma que as LTs polifásicas produzem intensidades de indução magnética menores por serem mais compactas. Na opinião deste pesquisador, as LTs polifásicas não reduzem a intensidade da indução magnética pelo fato de terem um número maior de fases. Como as LTs são polifásicas (6 ou 12 fases), a tensão entre fases é menor do que para uma LT trifásica para uma mesma potência transmitida. Como a tensão entre as fases é menor, a distância entre as fases também é menor e por consequência, a LT se torna mais compacta. Como observado em seções anteriores, a compactação é uma técnica utilizada para reduzir a intensidade da indução magnética produzida por LTs de potência. Desta forma, pelo fato da LT polifásica (6 ou 12 fases) ser mais compacta que uma LT trifásica, a intensidade da indução magnética por esta produzida seria menor.

Com relação ao campo elétrico produzido por uma LT polifásica, geralmente é de menor intensidade que aquele produzido por uma LT trifásica, já que as tensões entre fase da LT polifásica são menores que as tensões entre fase da LT trifásica.

Abaixo é feita a análise de uma LT polifásica (6 fases). A topologia utilizada para simulação é ilustrada na fig. 3.16. É a mesma do circuito duplo trifásico, ou seja, todas as dimensões da LT de 6 fases (d e D), a altura mínima (h) em relação ao solo e o ponto de medida do campo magnético (y_p) são idênticas às da LT trifásica. A potência de transmissão também é a mesma (as correntes das fases são idênticas, pois o sistema é simétrico e equilibrado, com diferença apenas no ângulo de fase, que é igual a 60°).

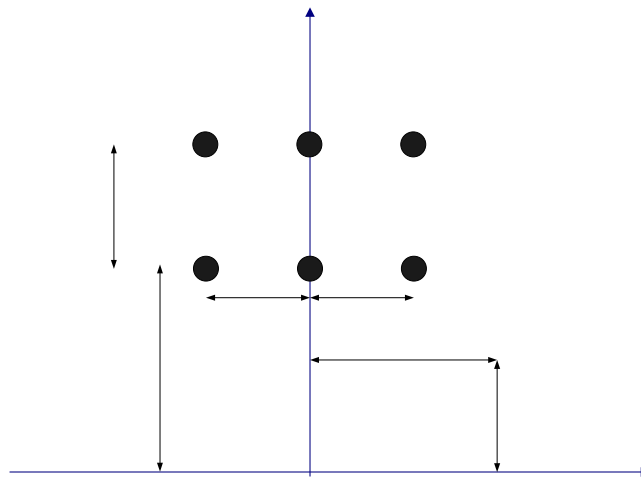


Figura 3.16. LT hexafásica horizontal .

A fig. 3.17 mostra os valores de indução magnética (circuito hexafásico) calculados a uma altura de 1 m a partir do solo para uma LT equilibrada e simétrica com condutores colocados a uma altura mínima de 12 m, separados por $d = 2$ m e $D = 3$ m, e percorridos por correntes de 500 A.

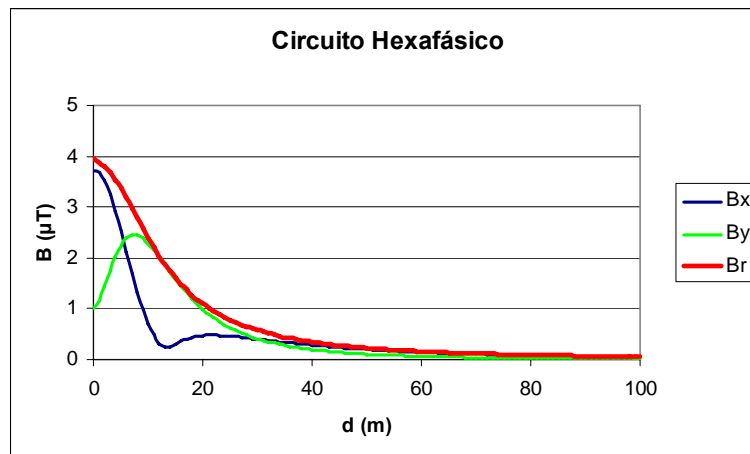


Figura 3.17. Induções magnéticas eficazes (B_x , B_y e B_r) para $\dot{I}_1 = 500 \angle 0^\circ A$, $\dot{I}_2 = 500 \angle 60^\circ A$, $\dot{I}_3 = 500 \angle 120^\circ A$, $\dot{I}_4 = 500 \angle 180^\circ A$, $\dot{I}_5 = 500 \angle 240^\circ A$, $\dot{I}_6 = 500 \angle 300^\circ A$, $h = 12$ m, $D = 3$ m, $d = 2$ m e $y_p = 1$ m.

Como antes, verifica-se que a indução magnética diminui à medida que se afasta da linha.

Através da análise dos resultados da simulação percebe-se que para a mesma estrutura física, a LT de 6 fases gera uma indução magnética de intensidade menor que aquela gerada pela LT trifásica de circuito duplo sem arranjo de fases. A LT trifásica de circuito duplo sem arranjo de fases produz uma indução magnética máxima de intensidade igual a aproximadamente $4,6 \mu T$. Já a LT de 6 fases produz uma indução magnética máxima de intensidade igual a aproximadamente $4 \mu T$. Desta forma, a LT de 6 fases produz uma indução magnética máxima aproximadamente 15 % menor que a indução magnética máxima produzida pela LT trifásica de circuito duplo sem arranjo de fases.

Desta forma, de acordo com a análise aqui realizada, percebe-se que as LTs de ordem de fase superior (LTs polifásicas) produzem induções magnéticas de intensidades menores que aquelas produzidas pelas LTs trifásicas, sejam elas de circuito simples ou de circuito duplo sem arranjo de fases.

3.2.14 Compensação ativa e passiva de campos magnéticos

Existem outras formas de redução de campos magnéticos além daquelas estudadas nas seções anteriores. Duas destas outras formas são a compensação ativa [47] e a compensação passiva [48] de campos magnéticos.

Na compensação ativa, um ou mais condutores são alimentados por uma fonte de tensão e estes produzem um campo magnético que tende a anular o campo magnético produzido pela LT. Desta forma, estes condutores devem estar situados em posições espaciais definidas e devem conduzir correntes tais que o campo magnético por eles produzido possa reduzir ou anular o campo magnético gerado pela LT. Esta técnica é cara e por esta razão sua aplicação é limitada.

Na compensação passiva, um anel (“loop”) de corrente ou janela condutora de corrente é colocada abaixo da LT com o intuito de reduzir ou anular a intensidade da indução magnética no nível do solo. O princípio de funcionamento é baseado na Lei de

Faraday e na Lei de Lenz, ou seja, um fluxo magnético variável produz uma tensão induzida (sendo um circuito fechado, haverá corrente induzida) e o fluxo magnético induzido é sempre contrário ao fluxo magnético indutor. Isto informa que o anel de corrente sempre produzirá uma indução magnética que tende a anular a indução magnética produzida abaixo da LT. De maneira geral, as dimensões do anel de corrente dependem das dimensões da LT e a espessura deste condutor depende da intensidade da indução magnética gerada logo abaixo da LT. Quanto maior for a intensidade da indução magnética gerada pela LT, maior será a espessura do condutor do anel de corrente. Cabe citar também que a inclinação do plano do anel de corrente em relação ao solo é uma variável importante na redução dos campos magnéticos produzidos pela LT. Esta técnica é mais barata e de aplicação menos limitada que a compensação ativa de campos magnéticos.

O objetivo deste trabalho esteve mais focado nas técnicas de redução de campos magnéticos vistas nas seções anteriores (acréscimo na altura, compactação dos condutores, balanceamento das correntes de fase, otimização no arranjo de fases e divisão de condutores). Para trabalhos posteriores, fica a sugestão de um aprofundamento no estudo das técnicas de redução de campos magnéticos que empregam a compensação ativa e a compensação passiva.

3.3 Conclusão

Neste capítulo foram estudadas várias técnicas usadas para a redução de campos magnéticos gerados por LTs de potência.

Percebeu-se que a elevação da altura das LTs é uma técnica bastante eficaz na redução da intensidade da indução magnética. Para as elevações propostas (1 m e 2 m), a redução na intensidade máxima da indução magnética variou de 15 % a 25 %, aproximadamente.

A compactação dos condutores da LT também foi uma técnica estudada e diagnosticada como eficaz na redução da intensidade da indução magnética. Para as compactações propostas (redução de 10 % e 20 % nas distâncias entre os condutores) a redução na intensidade máxima da indução magnética variou entre 10 % e 15 %, aproximadamente.

O balanceamento das correntes de fase também é uma técnica extremamente eficaz na redução da intensidade da indução magnética. Percebeu-se que o desbalanceamento das correntes de fase pode diminuir, aumentar ou mesmo não ter efeito sobre a intensidade do campo magnético próximo. Por outro lado, o campo magnético distante tem sua intensidade sempre aumentada em função de um desbalanceamento nas correntes de fase. Pode-se afirmar com certeza que o campo magnético distante é muito mais afetado que o campo magnético próximo, na ocorrência de desbalanceamentos de corrente no sistema. Percebeu-se também que o desbalanceamento nas correntes de fase altera drasticamente a taxa de variação da indução magnética em função da distância. Para LTs trifásicas equilibradas (com circuito simples ou circuito duplo, sem arranjo de fases), a taxa de decaimento da indução magnética em função da distância é igual a $1/r^2$. À medida que o sistema trifásico vai ficando desequilibrado, esta taxa de decaimento se altera, podendo ser igual a $1/r$ caso o desequilíbrio seja elevado. Se a LT em questão for equilibrada e do tipo circuito trifásico duplo com arranjo de fases otimizado (configuração de baixa reatância), a taxa de decaimento da indução magnética em função da distância é igual a $1/r^3$. Se esta LT entrar em desequilíbrio, a taxa de decaimento pode passar para $1/r^2$ ou mesmo $1/r$, dependendo da intensidade do desequilíbrio. De maneira geral, os condutores que mais

afetam a intensidade da indução magnética ao nível do solo, em função de desbalanceamentos de corrente, são os que transportam mais corrente e aqueles que estão mais próximos do solo.

A técnica da otimização do arranjo de fases foi uma das que mais se mostraram eficazes na redução da intensidade da indução magnética. O circuito duplo trifásico horizontal sem otimização do arranjo de fases apresentou uma indução magnética máxima igual a $4,6 \mu\text{T}$. O circuito duplo trifásico vertical sem otimização do arranjo de fases apresentou uma indução magnética máxima igual a $4,1 \mu\text{T}$. Com a aplicação da técnica da otimização do arranjo de fases (configuração de baixa reatância), a indução magnética máxima passou a ser aproximadamente igual a $1 \mu\text{T}$, implicando em uma redução de aproximadamente 75 %.

A divisão de condutores é outra técnica bastante eficaz na redução da intensidade da indução magnética. A topologia delta sem divisão de condutores apresentou uma indução magnética máxima igual a $3,7 \mu\text{T}$. Com a aplicação da técnica de divisão de condutores, para uma mesma potência transmitida, as topologias ΔSplit passaram a apresentar induções magnéticas máximas não superiores a $0,7 \mu\text{T}$. Isto demonstra uma redução de aproximadamente 80 % nos valores de indução magnética máxima produzida ao nível do solo. As topologias ΔSplit mostraram-se mais eficazes na redução da intensidade da indução magnética em relação às topologias convencionais (circuitos simples), na aplicação das técnicas que envolvem aumento de altura e compactação da LT. Para as duas técnicas estudadas, observou-se uma redução média aproximada de 30 % a 45 % na indução magnética máxima. Percebeu-se também que estas topologias são mais sensíveis a desbalanceamentos nas correntes de fase porque existem mais componentes de corrente no espaço sofrendo variações em suas intensidades.

Conclusão Geral

Muitos rumores existem sobre a conexão existente entre câncer e outras doenças e os campos eletromagnéticos ELF. Como foi visto no capítulo 1, não existe absolutamente nada de comprovado com relação a esta conexão em termos científicos. Pode-se afirmar que há uma grande preocupação de entidades governamentais, não governamentais e concessionárias de energia elétrica, com relação aos possíveis efeitos de campos eletromagnéticos ELF sobre a saúde humana, tratando-se de uma questão de saúde pública. Cabe ainda salientar que as concessionárias de energia elétrica têm procurado se adequar às normas regulamentadoras estabelecidas pelas organizações responsáveis, praticando desta forma o “Princípio da Precaução”.

No capítulo 2 foram estudados o campo elétrico e o campo magnético gerados por linhas de transmissão de potência, ou seja, os campos ELF (Extremely Low Frequency). Para o cálculo do campo elétrico gerado pelas linhas de transmissão de potência, foi estudado o método das cargas equivalentes, que é um método bastante utilizado na prática. Percebeu-se que o campo elétrico em questão é um fasor, ou seja, em cada direção (x e y) existe uma parcela de campo real e uma parcela de campo imaginária. Para o cálculo do campo magnético foi utilizado o método analítico e da mesma forma que para o campo elétrico, o campo magnético gerado por linhas de transmissão de potência é um fasor, ou seja, em cada direção (x e y) existe uma parcela de campo real e uma parcela de campo imaginária. Para o cálculo analítico do campo magnético foram utilizados códigos em MATLAB e as saídas gráficas forem apresentadas em EXCEL.

No capítulo 3 foram estudadas várias técnicas utilizadas na redução de campos magnéticos gerados por linhas de transmissão de potência. Percebeu-se que a elevação da altura das linhas de transmissão é uma técnica bastante eficaz na redução da intensidade da indução magnética. Para as elevações propostas (1 e 2 m) a redução na intensidade máxima da indução magnética variou de 15 a 25 %, aproximadamente. A compactação dos condutores da linha de transmissão também foi uma técnica estudada e diagnosticada como eficaz na redução da intensidade da indução magnética. Para as compactações propostas (redução de 10 e 20 % nas distâncias entre os condutores) a redução na intensidade máxima da indução magnética variou de 10 a 15 %, aproximadamente. O balanceamento das correntes de fase também é uma técnica extremamente eficaz na redução da intensidade da indução magnética. Percebeu-se que o desbalanço das correntes de fase pode diminuir, inalterar ou aumentar a intensidade do campo magnético próximo. Por outro lado, o campo magnético distante tem sua intensidade sempre aumentada em função de um desbalanço nas correntes de fase. Pode-se afirmar com certeza que o campo magnético distante é muito mais afetado que o campo magnético próximo, na ocorrência de desbalanços de corrente no sistema. Percebeu-se também que o desbalanceamento nas correntes de fase altera drasticamente a taxa de variação da indução magnética em função da distância. Para linhas de transmissão trifásicas equilibradas (circuito simples ou circuito duplo sem arranjo de fases), a taxa de decaimento da indução magnética em função da distância é igual a $1/r^2$. À medida que o sistema trifásico vai ficando desequilibrado, esta taxa de decaimento vai sendo alterada, podendo ser igual a $1/r$, caso o desequilíbrio seja elevado. Se a linha de transmissão em questão for equilibrada e do tipo circuito trifásico duplo com arranjo de fases otimizado (configuração de baixa reatância), a taxa de decaimento da indução magnética em função da distância é igual a $1/r^3$. Se esta linha de transmissão entrar em desequilíbrio, a taxa de decaimento pode passar para $1/r^2$ ou $1/r$, dependendo da intensidade do desequilíbrio. De maneira geral, os condutores que mais

afetam a intensidade da indução magnética ao nível do solo, em função de desbalanços de corrente, são os que transportam mais corrente e aqueles que estão mais próximos do solo. A técnica da otimização do arranjo de fases foi uma das que mais se demonstraram eficazes na redução da intensidade da indução magnética. Com a aplicação da técnica de otimização do arranjo de fases (configuração de baixa reatância), a intensidade da máxima indução magnética sofreu uma redução de aproximadamente 75 %. A divisão de condutores é uma técnica bastante eficaz na redução da intensidade da indução magnética. Aplicando-se esta técnica à topologia delta, houve uma redução de aproximadamente 80 % na intensidade da máxima indução magnética produzida no nível do solo. As topologias Δ Split demonstraram-se mais eficazes na redução da intensidade da indução magnética em relação às topologias convencionais (circuitos simples), na aplicação das técnicas que envolvem aumento de altura e compactação da LT. Para as duas técnicas estudadas observou-se uma redução média aproximada de 30 % a 45 % na intensidade da máxima indução magnética. Percebeu-se também que estas topologias são mais sensíveis a desbalanços nas correntes de fase porque existem mais amostras de corrente no espaço sofrendo variações em suas intensidades.

A transmissão polifásica contribui para a redução da intensidade da indução magnética gerada por LTs de potência. A transmissão hexafásica reduziu a intensidade da indução magnética em aproximadamente 15 %, em relação à transmissão trifásica de circuito duplo sem arranjo de fases.

As compensações ativa e passiva são utilizadas para a redução de campos magnéticos gerados por LTs de potência, mas estas técnicas não foram abordadas em profundidade neste trabalho. Fica como sugestão para os próximos trabalhos, um aprofundamento no estudo destas técnicas.

Uma análise de custos foi apresentada para a implantação de algumas das técnicas de redução de campos magnéticos estudadas. A compactação dos condutores reduz o custo para a implantação de novas LTs em cerca de 20 %. O balanceamento das correntes de fase é uma técnica bastante eficaz, podendo ser aplicada à novas LTs ou à LTs existentes, com um aumento de cerca de 5 % no custo. A elevação da altura é uma técnica indicada para novas LTs, aumentando o custo em cerca de 15 %. A otimização do arranjo de fases é uma técnica extremamente eficiente na redução de campos magnéticos, mas para a sua implantação o custo aumenta em cerca de 90 %.

Os custos para a implantação da transmissão polifásica são bastante elevados, cabendo uma análise bastante rigorosa para a sua implantação.

Mesmo não tendo sido feito um estudo aprofundado das técnicas de compensação ativa e passiva, sabe-se que a compensação ativa é onerosa enquanto a compensação passiva é de baixo custo.

A implantação de cada técnica dependerá da real necessidade e do custo envolvido. De maneira geral, as concessionárias de energia elétrica têm praticado o “Princípio da Precaução”, ou seja, mesmo que não se tenha uma certeza absoluta dos efeitos dos campos magnéticos ELF em seres vivos (humanos principalmente), soluções de custos aceitáveis devem ser praticadas para a redução destes campos.

É possível observar que as LTs de potência produzem induções magnéticas cujos valores estão bem abaixo dos valores limite determinados pela ICNIRP (83,3 μ T para o público em geral e 417 μ T para pessoas que trabalham no setor elétrico (ocupacional)).

Referências Bibliográficas:

- [1] BARNES, F.S.: “The effects of time varying magnetic fields on biological materials”. *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-16, Vol. 5, pp. 2092-2097, 1990.
- [2] CRISTEA, N.I.: “Compatibilidad electromagnética – la influencia del campo electromagnético sobre los organismos biológicos y los equipos electricos y electrónicos”. *Electrotécnica*, No. 6, Buenos Aires, 1990.
- [3] POLK, C., POSTOW, E.: “Handbook of biological effects of electromagnetic fields”. Boca Raton, Florida, CRC Press Inc., 1986.
- [4] EPSTEIN, B.R., FOSTER, K.R.: “Anisotropy in the dielectric properties of skeletal muscle”. *Med. Biol. Eng. Comp.*, Vol. 21, 1983.
- [5] DENO, D.W.: “Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field – measurement and calculation of distribution and dose”. *IEEE Transactions PAS*, Vol. PAS-96, No. 5, Sept/Oct, 1977.
- [6] CHIBA, A., ISAKA, K., KITAGAWA, M.: “Application of element finite method to analysis of induced current densities inside human model exposed to 60Hz electric field”. *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-103, No. 7, July, 1984.
- [7] HALLIDAY, D., RESNICK, R., et al.: “Fundamentos de física 1,2,3 e 4”. Editora LTC, 7ª. Edição, 2006.
- [8] BARNES, F., WATCHEL, H., SAVITZ, D., FULLER, J.: “Use of wiring configuration and wiring codes for estimating externally generated electric and magnetic fields”, *Bioelectromagnetics*, Vol. 10, pp. 13-21, 1989.
- [9] PINHO, A.C.: “O cálculo do campo elétrico em 2D gerado por linhas de transmissão e o efeito em seres vivos”. Dissertação de Mestrado, PPGEEL/UFSC, Florianópolis-SC, 1994.
- [10] OTA – Office of Technology Assessment: “Biological effects of power frequency electric and magnetic fields background paper”. BP-E-53, Washington, 1989.
- [11] INDIRA, N., MORGAN, M.G.: “60Hz and the human body”. *IEEE Spectrum*, tomo 27, No. 8, 1990.
- [12] CCRG - Childhood Cancer Research Group.
Disponível em: http://www.emfs.info/sci_ccrg.asp
Acesso em: 30/07/2008.
- [13] AHLBOM, ANDERS.
Disponível em: http://www.emfs.info/sci_ahlbom_results.asp
Acesso em: 30/07/2008.

- [14] UKCCS - The United Kingdom Childhood Cancer Study.
Disponível em: http://www.emfs.info/sci_UKCCS.asp
Acesso em: 30/07/2008.
- [15] NRPB - National Radiological Protection Board.
Disponível em: http://www.emfs.info/expert_NRPB.asp
Acesso em: 30/07/2008.
- [16] IARC - International Agency for Research on Cancer.
Disponível em: http://www.emfs.info/expert_IARC.asp
Acesso em: 30/07/2008.
- [17] ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.
Disponível em: <http://www.icnirp.de>
Acesso em: 30/07/2008.
- [18] OMS - Organização Mundial da Saúde.
Disponível em: <http://www.who.int/en/>
Acesso em: 30/07/2008.
- [19] AGNIR - Advisory Group on Non-Ionizing Radiation.
Disponível em: <http://www.hpa.org.uk/>
Acesso em: 30/07/2008.
- [20] SCENIHR - Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks.
Disponível em:
http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/scenihhr_cons_03_en.htm
Acesso em: 30/07/2008.
- [21] RUBIN, G. JAMES.
Disponível em: <http://www.psychosomaticmedicine.org/cgi/content/full/67/2/224>
Acesso em: 30/07/2008.
- [22] HPA - Health Protection Agency.
Disponível em: <http://www.hpa.org.uk/>
Acesso em: 30/07/2008.
- [23] GIBBS, HARRY.
Disponível em: http://www.emfs.info/sci_AnimalsPlants.asp
Acesso em: 30/07/2008.
- [24] ABRICEM – Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética.
Disponível em: <http://www.abricem.com.br/>
Acesso em: 30/07/2008.
- [25] TAKUMA, T., KAWAMOTO, T.: “Recent developments in electric field calculation”. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 2, March 1997, pp. 1155-1160.

- [26] BASTOS, J.P.A.: “Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática”, 1ª. edição, Editora da UFSC, Florianópolis-SC, 2004.
- [27] OLSEN, R.G.: “Electromagnetic fields from power lines”. *IEEE* 1993, pp. 138-143.
- [28] OLSEN, R.G.: “Calculation of ELF electric and magnetic fields in air”. *Field Computation Models – Course Notes- Topic#6*, EPRI, Palo Alto, CA.
- [29] KAUNE, W.T., ZAFFANELLA, L.E.: “Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 4, October 1992, pp. 2082-2091.
- [30] PETTERSSON, P., and ERIKSSON, R.: “Insulation optimization of a Swedish urban area line”. Presented at CIGRE symposium *Compacting overhead transmission lines*, Leningrad, USSR, 3-5 June 1991.
- [31] PETTERSSON, P.: “Simple method for characterization of magnetic fields from balanced three-phase systems”. Proceedings of Cigre Session 1992, pp 1-8.
- [32] ZAFFANELLA, L.E.: “Magnetic field management for overhead transmission lines: A primer”. General Electric Company, EPRI High Voltage Transmission Research Center, EPRI TR-103328, 1994.
- [33] PETTERSSON, P.: “Principles in transmission line magnetic field reduction”. Presented at the 1995 IEEE/PES Summer Meeting, Portland, Oregon, 23-27 July 1995.
- [34] PETTERSSON, P.: “Principles in power system magnetic field reduction”. Proceedings of IEEE Stockholm Power Tech conference, June 1995, pp. 358-363.
- [35] BUCHHOLTZ, H.: “Elektrische Strömungsfelder mit Schraubenstruktur”, *Elektr. Nachr.*, 1937, pp. 264-280.
- [36] BUCHHOLTZ, H.: “Elektrische und magnetische Potentialfelder” (Springer Verlag, Berlin, 1957).
- [37] ALKSNE, A. Y.: “Magnetic fields near twisted wires”, *IEEE Trans. Magn.*, 1964, 10, pp. 154-158.
- [38] MOSER, J. R., and SPENCER, R.F.: “Predicting the magnetic field from a twisted-pair cable”, *IEEE Trans.*, 1968, EMC-10, pp. 324-332.
- [39] SHENFELD, S.: “Magnetic fields of twisted-wire pairs”, *IEEE Trans.*, 1969, EMC-11, (4), pp. 164-169.
- [40] HABER, F.: “Magnetic field in the vicinity of parallel and twisted three-wire cable carrying balanced three-phase current”, *IEEE Trans.*, 1974, EMC-16, pp. 76-82.

- [41] HAGEL, R., GONG, L., and UNBEHAUEN, R.: "On the magnetic field of an infinitely long helical line current", *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, pp. 80-84.
- [42] PETTERSSON, P., and SCHÖNBORG, N.: "The magnetic field from twisted three-phase arrangements". Presented at the international symposium on *Electromagnetic compatibility*, EMC'96, Rome, Italy, 1996.
- [43] PETTERSSON, P., and SCHÖNBORG, N.: "Reduction of power system magnetic field by configuration twist". *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1997, (Accepted for publication).
- [44] LINDBERG, L.: "Reduction of magnetic fields from electric power and installation lines". *IEE Proc. - Sci. Meas. Technol.*, Vol. 145, No. 5, September 1998, pp. 215-221.
- [45] STEWART, J.R., DALE, S.J., KLEIN, K.W.: "Magnetic field reduction using high phase order lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, April 1993, pp. 628-636.
- [46] ZAFFANELLA, L.E.: "Magnetic field management for overhead transmission lines: A primer". General Electric Company, EPRI High Voltage Transmission Research Center, EPRI TR-103328, 1994.
- [47] CELOZZI, S.: "Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction". *IEEE 2002*, pp. 222-226.
- [48] YAMAZAKI, K., KAWAMOTO, T., FUJINAMI, H.: "Requirements for power line magnetic field mitigation using a passive loop conductor". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 2, April 2000, pp. 646-651.