

**ESTUDO DA EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS
NA FREQUÊNCIA INDUSTRIAL UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS**

Rafael Monteiro da Cruz Silva

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.
(Orientador)

Eng. Luís Adriano de Melo Cabral Domingues, M. Sc.
(Co-orientador)

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2009

Agradecimentos

Ao Eng. Luís Adriano pela oportunidade de estagiar no CEPEL e com isso participar ao lado dos pesquisadores Athanasio Mpalantinos e Carlos Ruy, do desenvolvimento de uma linha de pesquisa de avaliação da exposição humana a campos elétricos e magnéticos, que originou este Projeto Final de Graduação e gerou reconhecimento e a publicação de artigos em seminários nacionais e internacionais.

A pesquisadora Gloria Suzana, chefe do Departamento de Instalações e Equipamentos do CEPEL, pelo grande apoio às pesquisas desenvolvidas pelo grupo.

Aos meus pais, Alexandre e Ana Tereza, por seu carinho, dedicação e apoio em minha formação, renunciando em certos momentos as suas vontades individuais pelo bem-estar de nossa família.

A minha irmã Fernanda, por seu carinho e exemplo de sensibilidade.

Ao professor Sergio Sami, que foi fundamental em pelo menos dois momentos durante minha trajetória como aluno da graduação.

Aos colegas do DIE/CEPEL, pela amizade e solicitude, e pelos ensinamentos e experiências que adquiri por meio da convivência com profissionais tão capacitados.

Aos grandes amigos que conquistei na faculdade, pelos momentos de alegria e descontração, e pelo estímulo e apoio nos momentos difíceis.

Resumo do Projeto Final em Engenharia Elétrica apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica – UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

ESTUDO DA EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS NA FREQUÊNCIA INDUSTRIAL UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS

Rafael Monteiro da Cruz Silva

Fevereiro de 2009

Orientadores: Sergio Sami Hazan

Luís Adriano de Mello Cabral Domingues

Nos últimos anos, tem ocorrido uma crescente preocupação da opinião pública com os possíveis efeitos biológicos decorrentes da interação entre os seres humanos e os campos elétricos e magnéticos de frequência extremamente baixa (faixa de freqüência compreendida entre 3 Hz e 3 KHz), e isso tem resultado, em certos casos, em medidas extremas como ações públicas contra empresas do setor elétrico, solicitando tanto o impedimento da construção quanto da operação de linhas de transmissão e subestações.

Com o objetivo de regulamentar a exposição a esses campos foram desenvolvidas tanto por países quanto por instituições independentes, Normas e Diretrizes, estabelecendo limites e critérios de exposição a campos elétricos e magnéticos de baixa frequência.

Em linhas gerais a aplicação dessas diretrizes se faz comprovando o atendimento às restrições básicas, isto é, garantindo que os níveis de grandezas elétricas como densidades máximas de correntes ou campos elétricos induzidos no interior do corpo estejam abaixo dos níveis, que segundo resultados de pesquisas, poderiam provocar alterações no funcionamento do sistema nervoso central.

Por ser impraticável medir ou monitorar tais grandezas, visto que são internas ao corpo, são empregados nessa avaliação modelos computacionais representativos do corpo

humano e de algumas de suas partes principais, chamados de modelos dosimétricos. Para essa análise são utilizados diversos métodos numéricos, entre eles o método dos elementos finitos.

Neste trabalho são propostos um modelo dosimétrico, em elementos finitos, e uma metodologia que permitam avaliar a exposição humana a campos magnéticos uniformes de baixa freqüência, como os produzidos por linhas de transmissão em corrente alternada.

São apresentadas e discutidas também alternativas para redução nos níveis dos campos gerados por essas instalações, como alterações na configuração e técnicas de blindagem, que são técnicas aplicáveis a trechos próximos a locais considerados de uso sensível, como escolas, creches, hospitais e também a regiões residenciais ou com grande circulação de pessoas.

Palavras-chave: Linhas de transmissão, Campos elétricos e magnéticos, Modelo Dosimétrico, Normas de Exposição, Método dos elementos finitos, técnicas de mitigação.

Índice

CAPÍTULO 1	1
1.1 CONTEXTO	1
1.2 HISTÓRICO	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
CAPÍTULO 2	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	7
2.2 FONTES DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS	7
2.3 EXPOSIÇÃO A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS	10
2.3.1 CAMPO ELÉTRICO.....	10
2.3.2 CAMPO MAGNÉTICO	11
2.4 EFEITOS DOS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS	13
2.4.1 HISTÓRICO DAS PESQUISAS	13
2.4.2 ÁREAS DE PESQUISAS E ESTUDOS	14
2.5 DISTINÇÃO ENTRE OS MECANISMOS DE INTERAÇÃO: FORMAS DIRETAS E INDIRETAS DE ACOPLAMENTO	16
2.5.1 EFEITOS DIRETOS	18
2.5.2 EFEITOS INDIRETOS.....	19
2.5.3 EFEITOS DE LONGO PRAZO.....	20
2.6 COMPARATIVO ENTRE AS PRINCIPAIS NORMAS E DIRETRIZES DE EXPOSIÇÃO A CEM	20
2.6.1 MECANISMOS DE INTERAÇÃO E EFEITOS ESTABELECIDOS	22
2.6.2 ESTRUTURA DAS NORMAS	22
2.6.3 RESTRIÇÕES BÁSICAS.....	25
CAPÍTULO 3	28
3.1 INTRODUÇÃO.....	28
3.2 REVISÃO DE MODELOS DE DOSIMETRIA	29
3.2.1 EXPERIMENTOS PRÁTICOS	29
3.2.2 HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DOS MODELOS	31
3.3 DOSIMETRIA COMPUTACIONAL E OS MÉTODOS NUMÉRICOS.....	37
3.3.1 CAMPO ELÉTRICO.....	38
3.3.2 CAMPO MAGNÉTICO	40
CAPÍTULO 4	42
4.1 INTRODUÇÃO.....	42
4.2 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DOS TECIDOS BIOLÓGICOS.....	43
4.3 VARIABILIDADE.....	44
4.4 MEDIÇÃO DA CONSTANTE DE PERMISSIVIDADE	45
4.4.1 PRIMEIRO MÉTODO	45
4.4.1.1 RESULTADOS.....	46
4.4.1.2 CONCLUSÕES	49
4.4.2 SEGUNDO MÉTODO	50
4.4.2.1 RESULTADOS.....	50
4.4.2.2 CONCLUSÕES	54

CAPÍTULO 5	55
5.1 INTRODUÇÃO.....	55
5.2 IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS DOSIMÉTRICOS	56
5.2.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	60
5.3 ETAPAS DE SIMULAÇÃO.....	62
5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PROPOSTOS E VALIDAÇÃO	64
5.4.1 RESULTADOS.....	65
5.4.2 DISCUSSÃO.....	69
5.5 SIMULAÇÕES UTILIZANDO MODELO HETEROGRÊNEO	76
5.5.1 CONTRASTE NOS VALORES DE CONDUTIVIDADE DAS SUB-REGIÕES.....	76
5.5.1.1 RESULTADOS.....	77
5.5.2 INVESTIGAÇÃO DA VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE CORRENTE INDUZIDA COM A FREQÜÊNCIA	83
5.5.2.1 RESULTADOS.....	83
5.5.2.2 DISCUSSÃO.....	85
CAPÍTULO 6	86
6.1 INTRODUÇÃO.....	86
6.2 ALTERNATIVAS DE PROJETO: LT'S AÉREAS OU SUBTERRÂNEAS?	87
6.3 LT'S AÉREAS	90
6.3.1 ALTERAÇÕES NA CONFIGURAÇÃO	90
6.3.2 APLICAÇÕES DE ALTERAÇÕES NA CONFIGURAÇÃO	92
6.3.3 MÉTODOS DE BLINDAGEM	100
6.4 LT'S SUBTERRÂNEAS	102
6.4.1 CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO	102
6.4.2 MÉTODOS DE BLINDAGEM	103
6.5 APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE BLINDAGEM	104
CAPÍTULO 7	113
7.1 CONCLUSÕES FINAIS	113
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	116
REFERÊNCIAS.....	117
APÊNDICE A	121
APÊNDICE B	125
APÊNDICE C	127
APÊNDICE D	133

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

A intensificação no uso da eletricidade a partir da metade do século XX permitiu grande progresso econômico e desenvolvimento tecnológico às diversas nações ao redor do mundo, transformando todos os seus setores produtivos e tornando-se parte essencial na vida de suas populações.

Isso se refletiu na modificação das formas de utilização da energia elétrica em todos os setores da sociedade, tendo os aparelhos elétricos se tornado cada vez mais presentes em seu cotidiano, principalmente para os habitantes das grandes cidades, proporcionando maior conforto e segurança além de incontáveis facilidades.

Por sua vez, para atender a esse aumento de demanda por energia elétrica e manter a continuidade desse processo de desenvolvimento, percebeu-se que era necessário investir no reforço e modernização de todo o sistema elétrico.

Procurou-se investir tanto na construção de novas usinas geradoras quanto na ampliação da capacidade de transmissão de blocos de energia a longas distâncias (acima de 300 quilômetros), pois dependendo do tipo de fonte primária ou combustível utilizado, maiores se tornavam as distâncias entre as usinas e os centros consumidores.

A solução técnica empregada para atender a esses requisitos foi projetar e construir linhas de transmissão que operassem em tensões cada vez mais elevadas, com o objetivo de reduzir as perdas ôhmicas nos condutores e aumentar o fluxo de potência ativa através das linhas. Surgiram então, a partir da década de 60, as primeiras linhas de transmissão de alta tensão e de extra-alta tensão (EAT). O nível de tensão máximo de operação de linhas de transmissão é atualmente de 1.000 kV [1].

A FIGURA 1.1 ilustra o crescimento dos níveis de tensão do sistema de transmissão dos E.U.A. [2].

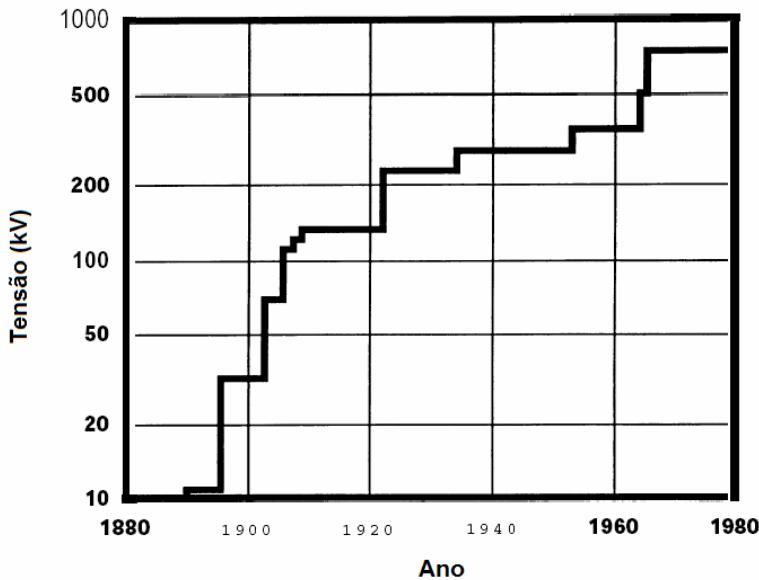


FIGURA 1.1: Aumento nos níveis de tensão do sistema de transmissão de energia dos E.U.A [2]

Por sua vez, para atender à demanda crescente dos grandes centros urbanos foram necessários constantes reforços e ampliações tanto na rede de distribuição quanto no sistema de transmissão, tornando a presença de subestações, linhas de transmissão e redes de distribuição aéreas, partes integrante da paisagem das grandes cidades.

Por diversos fatores, decorrentes até mesmo do processo de ocupação do espaço urbano, por vezes desordenado (invasões, ocupação de áreas restritas e faixas de servidão), tornou-se comum observar a localização de subestações próximas a locais de grande circulação de pessoas e linhas de transmissão atravessando áreas residenciais.

Esse fato despertou a atenção de parte da comunidade científica que passou a investigar se a exposição aos campos elétrico e magnético gerados por essas instalações poderia provocar efeitos adversos à saúde da população.

Dessa forma foram conduzidos diversos estudos [3] nos últimos 30 anos no sentido de avaliar a associação entre esses campos e possíveis efeitos sobre a saúde da população exposta, abrangendo as etapas de geração, transmissão e uso da energia elétrica.

1.2 Histórico

Destacam-se pelo pioneirismo os trabalhos de [4], tendo como objeto de estudo, trabalhadores russos de subestações de alta tensão, e de [5], que analisou populações vizinhas a uma linha de transmissão, localizada na cidade de Denver, nos Estados Unidos.

Em suas conclusões, o primeiro trabalho procurou associar as enfermidades observadas nos trabalhadores de subestações somente à exposição ao campo elétrico, com intensidade entre 15 kV/m e 25 kV/m, enquanto o segundo trabalho afirmou existir uma associação positiva entre a exposição a campos eletromagnéticos de baixa freqüência e a incidência de casos de leucemia em crianças.

Os resultados apresentados nesses trabalhos repercutiram tanto na comunidade científica quanto na população em geral, sendo posteriormente retomados após a publicação do artigo "THE HAZARDS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS I-POWER LINES" por Paul Brodeur, no New Yorker, motivando a realização de inúmeras pesquisas sobre efeitos de campos eletromagnéticos e intensa publicação de artigos científicos [3].

Em resposta a essa situação, muitos governos ao redor do mundo e empresas de serviços elétricos, têm alocado recursos substanciais em pesquisas em áreas como avaliação da exposição humana, cálculo de campos induzidos no corpo, epidemiologia, estudos em animais, estudos em células, mecanismos de interação e avaliação de risco.

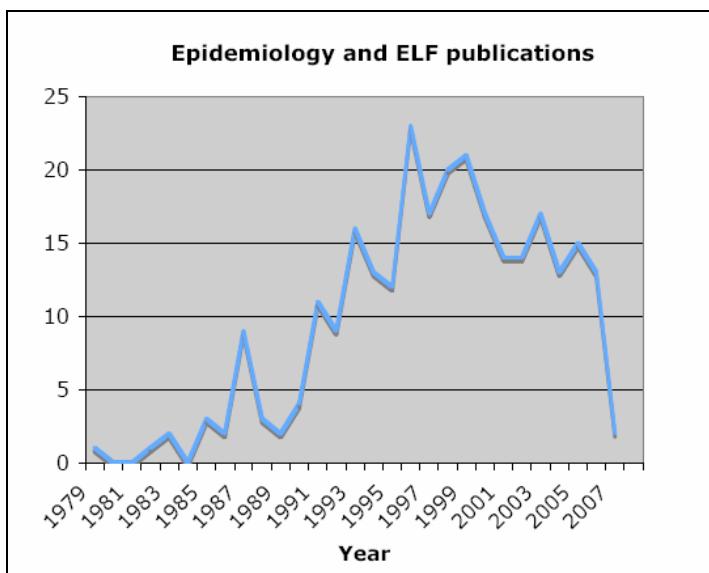


FIGURA 1.2: Evolução da produção de trabalhos de epidemiologia

Foram iniciados diversos programas, com destaque para o EMF RAPID (EMF Research and Public Information Dissemination), do Departamento de Energia dos EUA e supervisionado pelo NIEHS (National Institute of Environmental Health Sciences), e o International EMF Project, da Organização Mundial de Saúde (OMS/WHO), e têm sido publicadas Diretrizes para exposição a campos elétricos e magnéticos e a correntes de contato de freqüência extremamente baixa (0 - 3 kHz) [6 - 9].

O objetivo principal destas diretrizes é estabelecer níveis de exposição a campos eletromagnéticos que garantam a segurança e a proteção das pessoas contra possíveis efeitos adversos à saúde. Estes níveis de referência derivam de restrições básicas fundamentadas em

mecanismos estabelecidos de efeitos biológicos, como a estimulação de nervos periféricos, que em baixa freqüência, são expressas por grandezas como densidades máximas de correntes induzidas [7] e campo elétrico máximo induzido [8].

Por se tratarem de grandezas internas ao corpo humano e com isso impraticáveis de serem medidas ou monitoradas diretamente, utilizou-se nessas diretrizes modelos computacionais para a representação do corpo humano ou de alguma de suas partes. Através da comparação entre os valores de correntes induzidas ou campos elétricos induzidos no modelo com os valores estabelecidos para as restrições básicas é realizada a avaliação da segurança de determinada situação de exposição a campos eletromagnéticos.

No entanto, os modelos utilizados por [7] e [8] quando comparados aos de trabalhos publicados [10 - 12], já se mostram bastante simplificados.

Entre as Diretrizes existentes, a publicada pela Comissão internacional para proteção contra radiações não-ionizantes, a ICNIRP, avalizada pela OMS (Organização Mundial de Saúde), é a que tem sido adotada na maioria dos países do mundo como critério de proteção à exposição a campos eletromagnéticos.

Porém o fato destas diretrizes compreenderem apenas a exposição de curta-duração, por considerarem não existir evidência entre a exposição de longa duração e a ocorrência de doenças, como por exemplo, o câncer, alguns países tem buscado uma proteção adicional e adotado limites mais baixos que os encontrados no documento-guia da ICNIRP.

Apesar dos grandes investimentos em pesquisas, que têm gerado grande produção científica em variadas áreas de conhecimento, e da adoção de limites e critérios de exposição a campos eletromagnéticos por parte de muitos países, a ausência de resultados conclusivos sobre possíveis efeitos de campos elétricos e magnéticos de baixa freqüência sobre a saúde, não tem contribuído para reduzir a preocupação e a insegurança das pessoas sobre os riscos a esta exposição.

Essa insegurança tem resultado em alguns casos em medidas extremas, como ações contra empresas do Setor Elétrico tanto solicitando o impedimento da construção quanto da operação de Linhas de Transmissão e Subestações.

Tendo em vista as possíveis penalidades e prejuízos decorrentes dos atrasos na construção ou mesmo da interrupção na operação desses empreendimentos, torna-se fundamental às empresas do setor, incorporar aos seus projetos, estudos técnicos comprovando sua adequação às Normas Nacionais e Internacionais vigentes, relativas à exposição de pessoas a campos elétricos e magnéticos de baixa freqüência.

Este trabalho tem por objetivo propor uma metodologia que permita avaliar através de modelos dosimétricos a exposição humana a campos magnéticos de baixa freqüência

produzidos por linhas de transmissão. Este trabalho também propõe alternativas para a redução dos níveis de campo aplicáveis em trechos da linha de transmissão considerados sensíveis, como regiões residenciais, locais públicos com grande circulação de pessoas, creches e hospitais.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, descritos a seguir de forma resumida:

No Capítulo 2 é feita a contextualização do estudo da exposição humana a campos elétricos e magnéticos, apresentando de forma comparativa as diferentes fontes às quais a população está exposta em seu cotidiano. Apresentam-se as formas de interação entre campos elétricos e magnéticos e organismos vivos, discutindo-se a abordagem e a aplicação de Normas e Diretrizes que visam regulamentar e propor limites à exposição a CEM.

No Capítulo 3 é introduzido o conceito de dosimetria, enfocando-se a importância em se estabelecer um modelo geométrico que represente adequadamente o comportamento do corpo humano para o estudo da exposição a campos elétricos e magnéticos, ressaltando a evolução dos modelos dosimétricos, até o estágio atual da dosimetria computacional.

No Capítulo 4 destaca-se que para um modelo dosimétrico ser capaz de representar o corpo humano com fidelidade deve retratar tanto a geometria quanto as propriedades elétricas o mais próximo possível da realidade. Desta forma é apresentada uma proposta de metodologia que permite inferir a constante de permissividade aproximada do corpo humano, baseada fundamentalmente na análise da perturbação que o corpo provoca no campo elétrico externo.

No Capítulo 5 são apresentados três modelos dosimétricos representativos da região da cabeça, com diferentes graus de detalhamento geométrico, para avaliação da exposição a campo magnético. Propõem-se dois modelos chamados de homogêneos com geometria elíptica e esférica, e um modelo heterogêneo que retrata com maior fidelidade as diferentes regiões da cabeça.

No Capítulo 6 são mostradas as particularidades de LT's aéreas e subterrâneas no que se refere aos perfis dos campos gerados ao nível do solo utilizando uma modelagem computacional baseada nos Métodos dos Elementos Finitos e de Simulação de Cargas/Correntes. São apresentadas e analisadas alternativas para redução nos níveis dos campos gerados, especificamente alterações na configuração e a aplicação de técnicas de blindagem, apresentando resultados práticos de algumas medidas.

No Capítulo 7 são feitas as conclusões finais do trabalho e são discutidos aspectos a serem explorados em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Interação de campos elétricos e magnéticos em organismos vivos

2.1 Introdução

Neste capítulo é mostrado de que forma é feito o controle dos efeitos decorrentes da interação dos campos elétricos e magnéticos de baixa freqüência e os seres humanos, a partir da abordagem das principais Diretrizes de exposição.

2.2 Fontes de campos eletromagnéticos

Atualmente a população encontra-se envolvida por uma mistura complexa de campos eletromagnéticos de diferentes freqüências. A exposição a estes campos tem aumentado significativamente, uma vez que os avanços na tecnologia crescem continuamente e são descobertas novas aplicações. A FIGURA 2.1 apresenta algumas dessas fontes de campos elétricos e magnéticos.

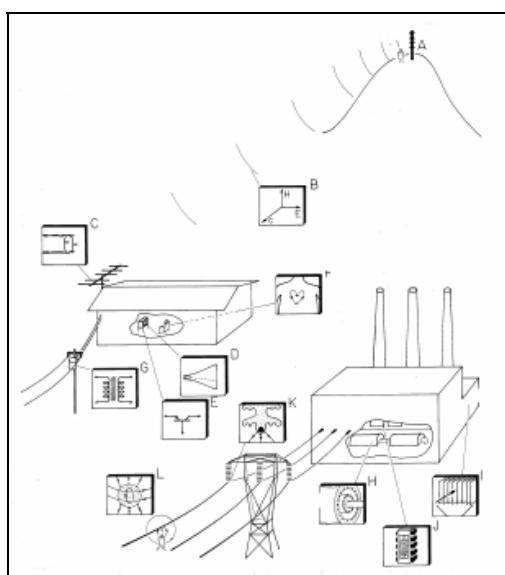


FIGURA 2.1: Fontes de campos elétricos e magnéticos

Estas fontes incluem, por exemplo, linhas de transmissão e de distribuição, aparelhos eletrodomésticos, computadores e televisores, radares, instalações emissoras de rádio e televisão, telefones móveis e suas estações rádio-base.

O espectro total dos campos eletromagnéticos pode ser separado em bandas discretas, possuindo diferentes interações com os organismos vivos: radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, microondas, campos de radiofrequência e campos de baixa frequência.

A FIGURA 2.2 apresenta o espectro eletromagnético indicando as fontes de campos elétricos e magnéticos que pertencem a cada banda de frequência, e o tipo de interação que ocorre com o organismo em cada uma delas.

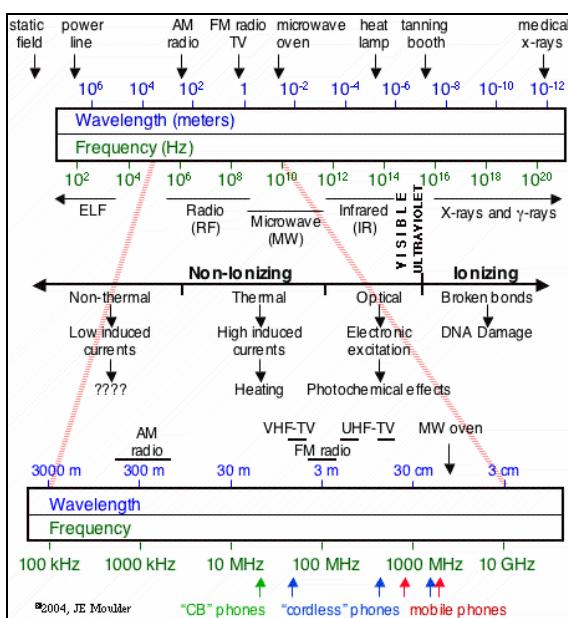


FIGURA 2.2: Espectro eletromagnético

A radiação ionizante que ocupa a parte superior do espectro eletromagnético inclui os raios-x, raios-gama emitidos por materiais radioativos e raios cósmicos. Estes se constituem tipos de radiação que penetram no corpo humano e possuem energia suficiente para quebrar ligações químicas, danificando órgãos internos e tecidos (danos às moléculas de DNA). Todos os outros tipos de radiação que não possuem energia suficiente para causar ionização são chamados de radiações não-ionizantes.

Pode-se destacar como os três principais tipos de campos eletromagnéticos não-ionizantes – os campos de radiofrequência, campos de frequência extremamente baixa e campos estáticos.

Na discussão sobre os possíveis efeitos biológicos dos campos eletromagnéticos, por vezes, faz-se referência ao fato da vida animal na Terra estar exposta há milhares de anos aos campos geomagnético e geoelétrico presentes na superfície do planeta.

Contudo, no atual estágio de conhecimento dos mecanismos de interação entre campos eletromagnéticos e os organismos vivos, tal associação já se mostra bastante questionável, pois já se sabe que os campos naturais da Terra por possuírem comportamento aproximadamente estático interagem de forma distinta dos campos variantes no tempo [13].

Informações a respeito das diferentes fontes de campos eletromagnéticos estáticos naturais e artificiais, como a intensidade dos campos gerados e principais características, estão contidas no APÊNDICE A.

Segundo o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) os campos eletromagnéticos podem ser classificados em faixas de freqüência, conforme apresentadas na TABELA 2.1:

TABELA 2.1: Faixas de freqüência

Faixas de freqüência	Classificação
30 kHz a 300 kHz	Freqüências baixas
3 kHz a 30 kHz	Freqüências muito baixas
3 Hz a 3 kHz	Freqüências extremamente baixas
Abaixo de 3 Hz	Freqüências ultra-baixas

A faixa de freqüência em destaque na TABELA 2.1 compreende as freqüências de 50 Hz e 60 Hz, que são utilizadas como padrão nos sistemas elétricos de potência e comumente chamadas de freqüências industriais.

A freqüência de 60 Hz é o padrão adotado no Brasil, nos países da América do Norte e partes do Japão, enquanto a freqüência de 50 Hz é o padrão da Europa e da maioria dos países, inclusive os demais países da América do Sul.

O fato do interesse do trabalho se concentrar na avaliação da exposição a campos elétricos e magnéticos na faixa de freqüência extremamente baixa, em que o comprimento de onda para a freqüência de 60 Hz, é de 5.000 km, que supera em algumas ordens de grandeza às dimensões do corpo humano, permite que estes campos sejam aproximados como campos quase-estáticos, onde os efeitos de propagação da onda podem ser desconsiderados, e o campo elétrico e campo magnético podem ser tratados separadamente. Dessa forma, torna-se inadequado o uso do acrônimo CEM para se referir aos campos elétricos e magnéticos contidos nessa faixa de freqüência. Maiores detalhes a respeito das características da aproximação por campos quase-estáticos podem ser vistos no APÊNDICE B.

Os campos elétricos e magnéticos associados às etapas de geração, transmissão e uso de energia elétrica, são em grande maioria, campos variantes no tempo, gerados

respectivamente pela presença de cargas elétricas e pelo movimento de cargas elétricas em condutores energizados.

Os campos elétricos são definidos por sua intensidade em volts por metro (V/m) e os campos magnéticos por sua densidade de fluxo magnético, expressas em tesla (T) no Sistema Internacional, ou alternativamente em gauss (G) e sua subunidade miligauß (mG).

2.3 Exposição a campos elétricos e magnéticos

Com o objetivo de caracterizar a exposição humana aos campos elétricos e magnéticos associados à geração, transmissão e uso da energia elétrica, foram conduzidas inúmeras pesquisas (EMF RAPID/EPRI e CEPEL) no sentido de identificar as diversas fontes emissoras e através de extenso trabalho de medição observar importantes aspectos como: intensidades dos campos presentes, a duração da exposição, as circunstâncias (ocupacional, utilização de um utensílio doméstico), locais (residências, escritórios, meios de transporte).

2.3.1 Campo elétrico

As pesquisas realizadas pelo EPRI [14] ressaltam, em suas conclusões, que a exposição a campos elétricos em casa e no local de trabalho não tem sido bem caracterizada, sobretudo pela perturbação que o corpo humano e outros objetos exercem no campo, fazendo-o costumeiramente não-uniforme e por isso, de difícil medição. Os principais resultados do trabalho do EPRI serão mostrados na seqüência.

Em geral os campos elétricos presentes em casa ou no escritório estão entre 1 - 20 V/m , porém próximos a vários utensílios elétricos e alguns aparelhos eletrônicos podem ser muito maiores (até cerca de 300 V/m), mas decrescem rapidamente com a distância. Observou-se que intensidades altas de campo elétrico, da ordem de 1-10 kV/m , estão presentes apenas sob linhas de transmissão de alta-tensão, e decrescem a valores menores que 10 V/m a uma distância de 100 m do centro da LT. Constatou-se também que trabalhadores em algumas ocupações estão sujeitos à exposição a campos elétricos altos, intensidades de 1 a 10 kV/m são valores comuns em subestações de energia elétrica.

Na FIGURA 2.3 é sumarizado o resultado dessas pesquisas através da comparação entre os níveis de campo elétrico de diversas fontes de campo elétrico.

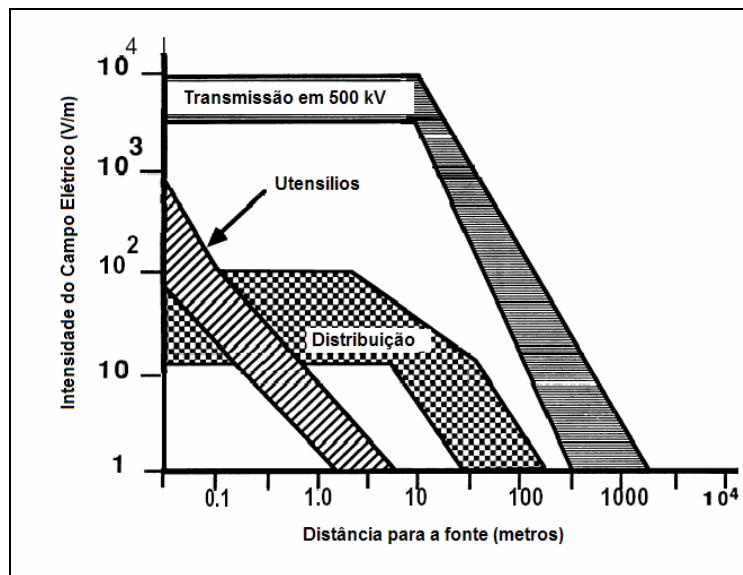


FIGURA 2.3 Comparação de intensidade de campo elétrico [15]

2.3.2 Campo magnético

A exposição a campos magnéticos diferentemente do que ocorre com o campo elétrico tem sido bem caracterizada por medições realizadas em vários locais utilizando instrumentos convencionais, e através de medições utilizando dosímetros, que fixados ao corpo de pessoas em residências e locais de trabalho, permitiu a avaliação do nível de exposição diária às diversas fontes de campos magnéticos.

Observou-se que os níveis típicos em casa e no escritório estão entre 0,05 - 0,3 μT , com níveis na maioria das casas abaixo de 0,1 μT . A exposição típica em casa (50 %) está situada entre 0,06 - 0,13 μT , com valor médio de 0,2 μT , em menos que 5 % das casas de 0,04 μT e em 95 % é de 0,5 μT . Constatou-se que os utensílios domésticos podem produzir altos campos localizados, variando até 150 μT , a uma distância de até 0,15 m e que as linhas de transmissão de alta-tensão produzem densidade de fluxo magnético abaixo de 10 μT sob a linha. Estes campos decrescem a menos de 0,15 μT a uma distância de 100 m.

Estes resultados foram apresentados pelo Programa EMF RAPID (EMF Research and Public Information Dissemination) apoiado em pesquisa realizada pelo EPRI, que concluiu que o nível de exposição diária da população dos E.U.A. é em média inferior a 2 mG, com intensidades maiores no trabalho do que em casa.

Na FIGURA 2.4 é sumarizado o resultado dessas pesquisas através da comparação entre os níveis de campo magnético de diversas fontes emissoras de campo magnético.

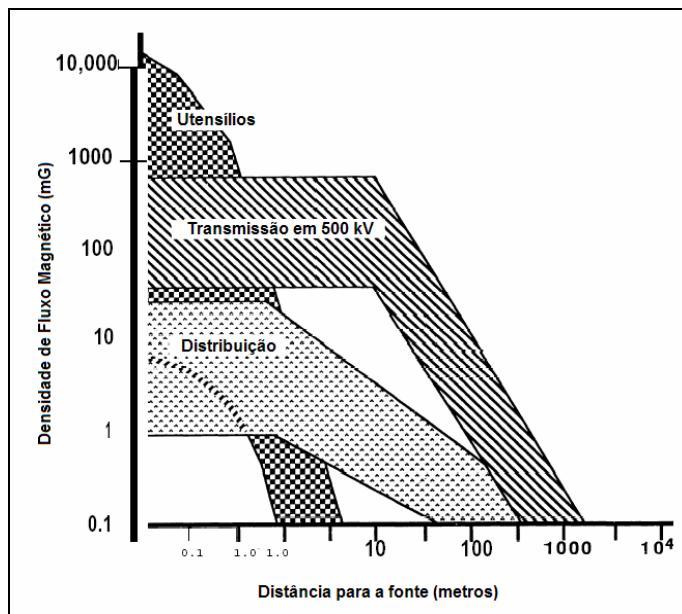


FIGURA 2.4: Comparação de valores de campo magnético [15]

Na FIGURA 2.5 são apresentados na forma de um mapa síntese, os resultados de um trabalho de medição de valores de campo magnético em 60 Hz [16], realizado pelo CEPEL, visando caracterizar os níveis de campo magnético em diferentes locais e situações características de ambientes urbanos aos quais a população está exposta em seu cotidiano.

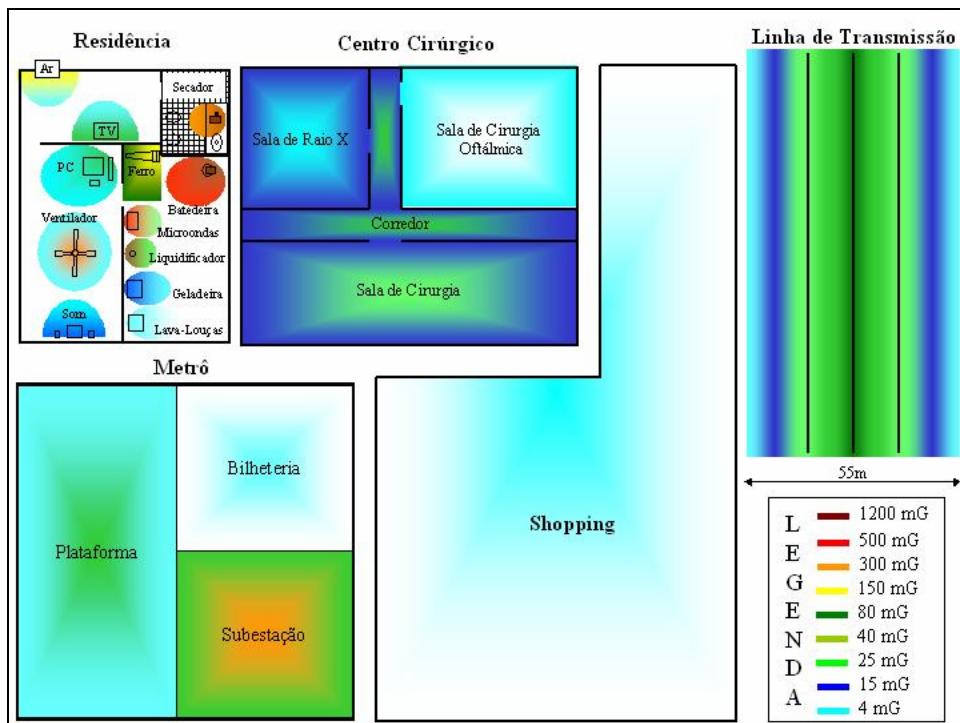


FIGURA 2.5: Mapa síntese com comparação de campo magnético nos diferentes ambientes medidos

Os resultados mostram que os valores dos campos magnéticos produzidos por utensílios ou aparelhos elétricos de uso diário são bastante próximos, e alguns casos até superiores aos existentes nas proximidades de linhas de transmissão. Esta pesquisa também constatou que a densidade de campo magnético em uma residência com todos os equipamentos elétricos desligados é de 3 mG.

O valor encontrado em [16] supera em 1 mG o valor encontrado por [14], o que pode indicar um aumento nos níveis de exposição decorrentes do aumento do número de fontes presentes no cotidiano das pessoas.

Além disso, já existe preocupação com a maciça nuvem eletromagnética na qual a população está exposta, que tem sido chamada por estudiosos de ELECTROSMOG (SUÍÇA). Entendeu-se que devem ser aplicadas medidas para redução dos níveis de campo emitidos por cada fonte, ao menor valor que seja economicamente viável, tendo em vista a “poluição eletromagnética” que a população está submetida em seu cotidiano. Esta abordagem é a essência da aplicação da Lei Sobre Proteção Contra Radiação Não-Ionizante (Ordinance relating Protection from Non-ionizing Radiation) promulgada em 1º de Fevereiro de 2000 na Suíça, que sistematiza os limites de exposição para emissão total dos CEM.

2.4 Efeitos dos campos elétricos e magnéticos

2.4.1 Histórico das pesquisas

Diferentemente do campo magnético, a exposição ao campo elétrico em determinados níveis pode provocar no corpo humano reações externas evidentes, como por exemplo, eriçamento dos cabelos, que são fenômenos amplamente utilizados em estudos para determinação dos limiares de percepção de campo.

A existência de tais fenômenos proeminentes determinou, de certo modo, que as primeiras pesquisas se concentrassem na investigação da existência ou não de associação entre a exposição a campo elétrico intenso e possíveis efeitos adversos à saúde.

Exemplo disso foi o trabalho desenvolvido por [3], que informou a ocorrência de enfermidades como dores de cabeça, fadiga, alterações na pressão sanguínea e nos batimentos cardíacos, em trabalhadores soviéticos de subestações de alta tensão (400 a 750 kV). Os tipos de sintomas relatados sugeriram a hipótese que a exposição a campos intensos provocaria efeitos adversos ao sistema nervoso. Entretanto, os estudos realizados não tiveram adequados grupos de controle e não consideraram a possibilidade dos efeitos adversos serem decorrentes de outros fatores, como o ambiente e o estilo de vida, que são aspectos fundamentais em um estudo epidemiológico.

Posteriormente, estudos semelhantes foram realizados com trabalhadores no Canadá, Suécia, Grã-Bretanha e Estados Unidos, que por sua vez não confirmaram as enfermidades relatadas nos estudos soviéticos.

Nas décadas subseqüentes o foco das pesquisas epidemiológicas fixou-se na exposição ao campo magnético, tentando associá-la a efeitos adversos como depressão e suicídio, abrangendo tanto a população próxima a linhas de transmissão quanto os trabalhadores de companhias de eletricidade.

No entanto, os resultados dessas pesquisas até o momento não forneceram evidências convincentes dessa associação, reforçando a conclusão emitida, em 1998, pelo National Institute of Environmental Health Statistics Working Group (NIHS) [14].

2.4.2 Áreas de pesquisas e estudos

A condução de estudos científicos na área de efeitos biológicos dos campos eletromagnéticos envolve o inter-relacionamento e a cooperação técnica de quatro grandes áreas de pesquisas:

1. Estudos experimentais em humanos;
2. Estudos em laboratório: experimentos em animais e células;
3. Estudo em populações humanas (Epidemiológicos);
4. Simulações computacionais.

Deve-se ressaltar que todos os grupos provêm informações que poderão embasar se determinada exposição a CEM causa efeitos à saúde, já que nenhum estudo individual por si só é considerado definitivo ou soberano.

Na FIGURA 2.6 é mostrado de forma esquemática o inter-relacionamento dos quatro grupos de estudo.

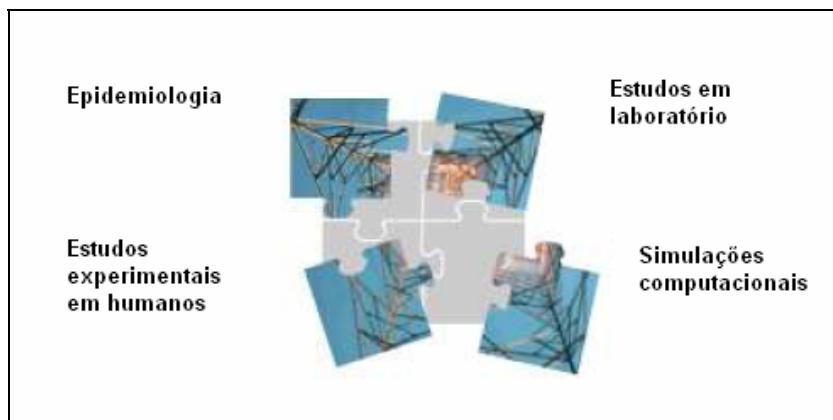


FIGURA 2.6: Inter-relação entre as áreas de pesquisas e estudos de efeitos biológicos

Nos estudos experimentais em humanos, voluntários são submetidos à exposição controlada a campos elétricos e magnéticos, em curtos períodos de tempo. São analisadas múltiplas funções, como a memória, atenção, tempo de reação, atividade elétrica do cérebro e parâmetros imunológicos (glóbulos brancos).

Os estudos em laboratório, realizados com células ou animais, podem fornecer evidências que auxiliem na determinação se um agente como o CEM causa efeito nocivo ou não.

De forma resumida esses estudos são realizados para atingir aos seguintes propósitos:

- Estudos em células: Podem aumentar o entendimento dos mecanismos biológicos pelos quais a doença ocorre;
- Experimentos com animais: Fornecem meios de se observar efeitos de um determinado agente sob condições cuidadosamente controladas.

No entanto, nenhum estudo com células ou animais pode recriar a natureza complexa de todo organismo humano e sua interação com o seu ambiente.

Por isso é necessário cautela tanto em aplicar os resultados de estudos com células ou animais diretamente aos seres humanos, quanto em concluir a respeito da segurança de um determinado agente, tendo por base a ausência de efeitos em estudos em laboratório.

- Estudos clínicos: Nesses estudos os voluntários são expostos a campos elétricos e magnéticos em níveis mais elevados daqueles encontrados normalmente no seu cotidiano. São monitorados os batimentos cardíacos, a atividade cerebral, o nível hormonal, de grupos expostos e não-expostos, a fim de avaliar as diferenças resultantes desta exposição;
- Epidemiológicos: São baseados na observação estatística de grupos com o objetivo de definir padrões e possíveis causas de determinadas doenças, sendo considerados uma valiosa ferramenta para identificar riscos à saúde humana. São observados e comparados grupos de pessoas, que tiveram ou não tiveram certa doença, e os níveis de exposição, a fim de observar se o risco à doença é diferente entre grupos expostos e não-expostos.

A modelagem computacional ou teórica busca com o auxílio de computadores e das características das propriedades elétricas e geométricas do corpo humano, recriá-lo de tal forma que permitam representá-lo adequadamente para avaliar sua exposição e interação com campos elétricos e magnéticos externos. A partir desses modelos é possível calcular a

distribuição de correntes induzidas no corpo humano uma vez que seria impraticável medi-la em organismos vivos.

Esta área de pesquisa é onde reside o interesse principal do presente trabalho, em que será mostrada a evolução da representação geométrica do corpo humano e destacada também a necessidade de se caracterizar corretamente as suas propriedades elétricas em um estudo de avaliação de exposição a campos.

2.5 Distinção entre os mecanismos de interação: Formas diretas e indiretas de acoplamento

Os mecanismos de acoplamento entre o corpo humano e os campos elétricos e magnéticos distinguem-se em formas indiretas ou diretas de acoplamento. A distinção é feita pela presença ou não de um segundo corpo ou objeto também sob exposição aos campos. [17]

Portanto, constituem em formas indiretas de interação:

- Indução de correntes elétricas em objeto condutor exposto a campo elétrico, podendo percorrer o corpo humano em caso de contato;
- O corpo humano sobre solo carregado de correntes elétricas pode ser exposto a um potencial de passo que vai causar circulação de correntes no corpo;
- Descargas transitórias e micro-descargas podem ocorrer quando um ou mais corpos ficam próximos a um objeto metálico que está carregado pela presença de um campo elétrico intenso e/ou no instante de seu contato ou afastamento;
- Acoplamento entre o campo magnético e objetos condutores, como cercas metálicas, podendo causar corrente percorrendo o corpo humano em caso de contato.

E constituem-se formas diretas de interação:

- Ação do campo elétrico resulta na aplicação de um campo elétrico na superfície externa do corpo e indução de cargas na superfície, e consequente indução de campos elétricos e correntes;
- Ação do campo magnético resulta na penetração de campo magnético por todo o corpo, indução de campos elétricos e correntes, e aplicação de forças sobre cargas em movimento no interior do corpo;

As correntes de contato direto são correntes que fluem através do corpo humano devido ao toque em objeto com tensão induzida pela ação do campo elétrico. Estas podem ocorrer em três situações:

- Quando uma pessoa toca ou segura dois objetos com diferentes potenciais;
- Quando uma pessoa que está aterrada (potencial zero) toca um objeto com potencial diferente da terra;
- E a situação oposta, quando a pessoa exposta a um campo elétrico toca um objeto aterrado.

A FIGURA 2.7 ilustra a interação indireta de uma pessoa e o campo elétrico gerado pela linha de transmissão. Especificamente nessa situação de exposição o objeto encontra-se isolado e a pessoa está aterrada.

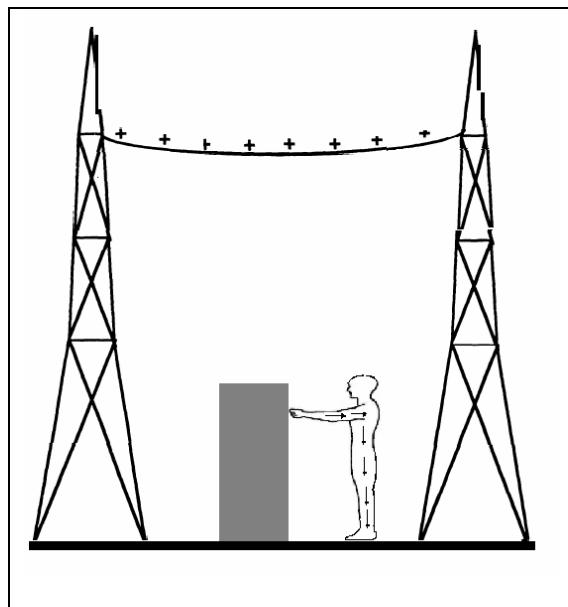


FIGURA 2.7: Forma de interação indireta

Na FIGURA 2.8 são apresentadas, de forma esquemática, as duas formas diretas de interação do corpo humano, a FIGURA 2.8a a interação com o campo magnético e a FIGURA 2.8b a interação com o campo elétrico, ambos gerados por uma linha de transmissão.

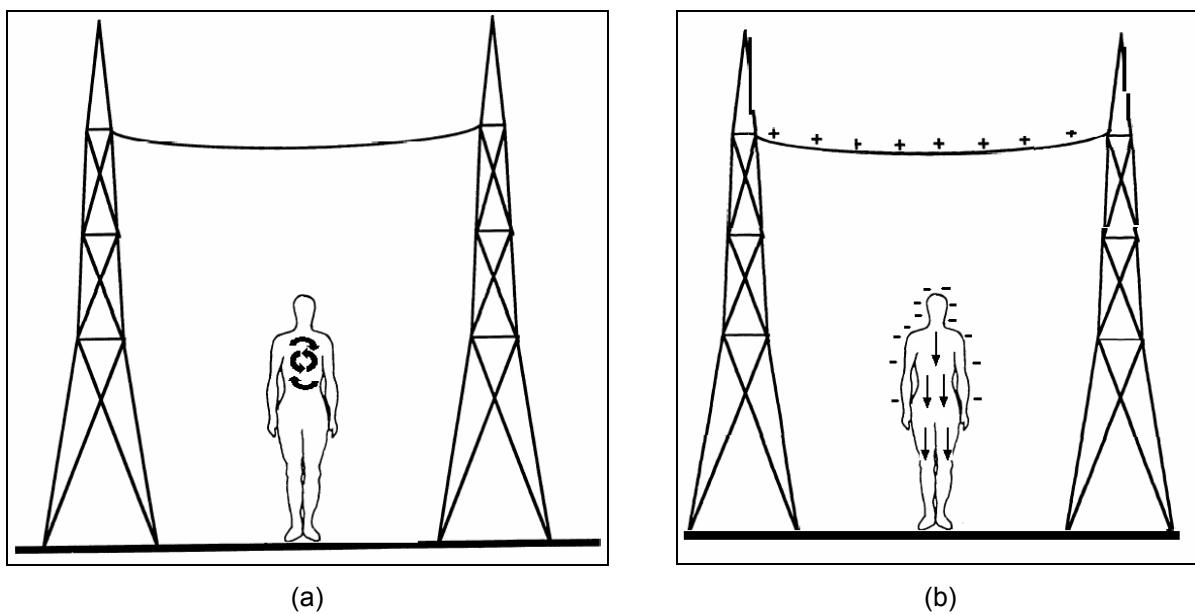


FIGURA 2.8: Formas de interação direta

2.5.1 Efeitos diretos

A partir da revisão de evidências científicas concluiu-se que a base de orientação mais coerente e plausível para limiares de possíveis efeitos adversos à saúde se refere às interações de um campo elétrico fraco no cérebro e no sistema nervoso central (SNC). Esta abordagem foi utilizada no desenvolvimento das mais reconhecidas Diretrizes de Exposição a CEM [18 - 21].

Uma vez que o cérebro e o sistema nervoso operam usando padrões de sinais elétricos altamente complexos, devem ser estabelecidos níveis máximos de campos elétricos e densidades de correntes induzidas nesses tecidos, limitando-o quanto for possível, para que não afetem adversamente o funcionamento normal. Estes valores limite estabelecidos são chamados de restrições básicas em diretrizes de exposição.

A observação de um efeito não implica diretamente que exista um dano ou probabilidade de formação de doença.

Deve-se ressaltar que embora estes valores fornecam um indicativo do aumento da probabilidade de ocorrências de efeitos em valores acima daqueles indicados nas restrições básicas, não devem ser considerados como valores precisamente determinados, abaixo dos quais não existem efeitos adversos e acima dos quais os efeitos discerníveis ocorrem.

Na seção 2.7 a relação entre os efeitos diretos e as restrições básicas será revista com maiores detalhes sob a abordagem utilizada nas Normas de exposição a campos.

2.5.2 Efeitos indiretos

Por definição os efeitos da estimulação indireta ocorrem através da transferência de carga entre uma pessoa e um objeto condutor sob ação de um campo [18].

Os efeitos mais significativos da electroestimulação pela ação de campo elétrico se referem à ocorrência de correntes de contato e descargas capacitivas. Estes efeitos podem ser mais severos quando uma pessoa aterrada (potencial zero) toca um grande objeto condutor que está perfeitamente isolado e sob ação de um campo elétrico intenso. A intensidade dos efeitos depende da área efetiva de indução do objeto e sua capacidade para a terra.

Sob campos suficientemente intensos, um indivíduo pode perceber descargas capacitivas no momento que antecede um contato direto e depois de interrompido o contato com objetos condutores que estão bem isolados da terra. Em geral, os valores susceptíveis de ocorrer na vizinhança de LTs não ultrapassam o limiar de desconforto, não sendo caso, em geral, de adotar limites de segurança.

Os choques por contato entre pessoas e objetos já foram razoavelmente estudados e foi estabelecida uma escala que vai do limiar de percepção, passando por sensações de incômodo e dor, até chegar ao risco de fibrilação cardíaca. E a severidade depende do tamanho do objeto induzido, assim como o grau de isolamento da terra para a pessoa e o objeto condutor.

Os níveis de segurança são determinados para a pior condição: uma pessoa totalmente isolada do solo, tocando um objeto perfeitamente aterrado e, a situação inversa, um objeto isolado descarregando através de uma pessoa estabelecendo contato perfeito com o solo. Adota-se o limiar de percepção para adultos como corrente limite ($\sim 1 \text{ mA}$).

A intensidade das descargas capacitivas vai depender da tensão induzida no objeto condutor e de sua capacidade para a terra, enquanto o módulo das correntes de contato vai depender da área efetiva do objeto induzido, da freqüência do campo e da capacidade.

A componente da corrente de contato, I_c , para uma pessoa ereta tocando um objeto aterrado (potencial zero) sob ação de um campo elétrico polarizado verticalmente, é dado pela Equação 2.1 [22]:

$$I_c = 9,0 \times 10^{-11} h^2 f E \quad (2.1)$$

onde,

h é altura da pessoa;

f é a freqüência do campo;

E é a intensidade do campo elétrico.

Próximo ao limiar de dor existe uma condição que já é considerada grave, em termos de segurança, que é o de perda de controle muscular. Nesta situação a pessoa pode ter uma contração muscular involuntária e ficar incapaz de desfazer o contato elétrico (*let-go*), ficando exposta a risco. O limiar deste efeito (~ 5 mA) é muito inferior ao de fibrilação cardíaca (~150 mA), porém já é considerado de alto risco, portanto intolerável.

A relação com as dimensões do corpo é verificada em reações sensoriais, limiares de *let-go* e fibrilação ventricular. Os limiares de *let-go* variam quase proporcionalmente ao peso do corpo. Desta forma seria natural concluir que indivíduos menores, especialmente as crianças, seriam os mais suscetíveis. Porém, o módulo da corrente induzida pelos campos elétricos e magnéticos diminui com a redução na altura do corpo. Já em relação à corrente de contato, os indivíduos menores têm normalmente uma maior resistência entre os membros (interlimb resistance) que indivíduos maiores. Devido a esses fatores compensatórios, não se espera um grande efeito do tamanho do corpo.

2.5.3 Efeitos de longo prazo

A possibilidade dos campos eletromagnéticos de baixa freqüência causarem modificações biológicas que venham a ser responsáveis, no longo prazo, por efeitos indesejáveis, é um assunto que vem produzindo alguma polêmica, porém a posição científica atual não reconhece qualquer evidência conclusiva de relação entre campos EM e efeitos de longo prazo. Não havendo evidência de relação causal, não há também base científica para propor limites neste caso.

2.6 Comparativo entre as principais Normas e Diretrizes de exposição a CEM

Até este momento não existe uma Norma ou Diretriz definindo limites de exposição a campos elétricos e magnéticos de freqüência extremamente baixa que seja adotada internacionalmente. Informações adicionais a respeito da regulamentação internacional de limites podem ser encontradas no Apêndice C.

Porém, muitos países incluindo a União Européia, possuem Normas ou Recomendações que seguem as Diretrizes da ICNIRP, publicadas em 1998.

Nestas Diretrizes, intituladas *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, foram usados apenas efeitos estabelecidos como base para as restrições de exposição. Foram considerados apenas os

efeitos imediatos à saúde, de curto prazo, tais como, estimulação dos nervos periféricos e músculos, choques e queimaduras causadas pelo toque em objetos condutores, assim como a elevação da temperatura dos tecidos resultante da absorção de energia durante a exposição a CEM.

É interessante perceber que os limites de campo, expressos através dos níveis de referência nas recomendações da ICNIRP, embora tenham a intenção de proteger contra efeitos diretos, são suficientes também para proteger contra efeitos indiretos na grande maioria das situações próximas às linhas de transmissão. Entretanto, devem ser considerados outros métodos de controle principalmente na situação de choque pelo contato em um grande objeto metálico, não-aterrado e carregado pela presença do campo elétrico.

Campos elétricos podem interferir em aparelhos médicos implantados (marca-passos cardíacos e próteses metálicas) podendo causar o seu mau funcionamento. A conformidade com a Diretriz não garante que sejam evitadas interferências ou efeitos em tais dispositivos médicos.

Os efeitos de longo prazo, como o alegado aumento do risco de câncer, não foram considerados, pois a ICNIRP concluiu que os dados disponíveis são insuficientes para servir como base para um ajuste nas restrições de exposição.

A Norma publicada pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), intitulada *IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz*, utilizou para a determinação das restrições de exposição uma classe de mecanismos relacionados à polarização da membrana e à alteração do potencial natural de repouso da membrana celular.

Os limites máximos de exposição foram estabelecidos a fim de evitar as seguintes reações de curta duração:

- Estímulo muscular que pode causar danos na execução de atividade potencialmente perigosa;
- Excitação dos neurônios ou direta alteração na atividade sináptica dentro do cérebro;
- Excitação cardíaca;
- Efeitos adversos associados com potenciais induzidos ou forças dentro do corpo;

2.6.1 Mecanismos de interação e efeitos estabelecidos

Numerosos mecanismos de interação têm sido desenvolvidos para explicar as reações humanas à energia elétrica. Estes são classificados de acordo com seu estágio de pesquisa em mecanismos estabelecidos e propostos. Para que seja considerado estabelecido, um mecanismo deve possuir as seguintes características [22]:

- Pode ser usado para predizer efeitos biológicos em humanos;
- Pode ser modelado explicitamente usando equações ou relações paramétricas;
- Foi verificado *in the intact human*, podendo ser extrapolado para humanos de forma segura;
- É suportado por forte evidência;
- É aceito entre especialistas na comunidade científica.

Caso o mecanismo não possua essas características é classificado então como proposto.

Entre os efeitos estabelecidos, o de maior destaque em Normas nas freqüências relativamente baixas, é o efeito nos tecidos excitáveis, referidos como eletroestimulação.

Nas freqüências inferiores a 100 kHz, os limiares para reação de eletroestimulação são tipicamente menores que os limiares para reação térmica. Acima de 100 kHz, tal situação se inverte, com os efeitos térmicos exibindo menores limiares de reação do que os efeitos de eletroestimulação.

2.6.2 Estrutura das Normas

As mais importantes Diretrizes internacionais de exposição a campos (ICNIRP e IEEE) adotam a seguinte estrutura [24]:

- I. São determinados valores para grandezas físicas (correntes, campos) que quando superados podem provocar efeitos fisiológicos indesejáveis no corpo;
- II. São aplicados fatores de redução, baseados em critérios de segurança (fator 5, ICNIRP, e fator 3, IEEE) definindo os máximos valores admissíveis para estas grandezas. Estes valores limites são chamados de Restrições Básicas;

As restrições básicas compreendem valores de densidades máximas de correntes (ICNIRP) e campo elétrico máximo induzido em certas regiões do corpo (IEEE), em que se evitam efeitos como estimulação do sistema nervoso central e dos nervos periféricos. A partir

desses valores são aplicados fatores de redução distintos para as duas categorias de exposição consideradas: a ocupacional e o público geral. Isso resulta em níveis de exposição mais restritivos para o público geral, oferecendo proteção adicional, tendo em vista a maior heterogeneidade nas condições de saúde dessa categoria.

- III. Calculam-se através de modelos matemáticos os valores dos campos aplicados externamente (elétrico e magnético) que se pode assegurar que não induzirão aqueles níveis determinados. Estes limites de CEM's são chamados Níveis de Referência.

Os modelos matemáticos empregados por IEEE e ICNIRP para derivar os níveis de referência a partir das restrições básicas são bastante similares. Para relacionar as grandezas internas (densidades de correntes induzidas) com o campo magnético externo a ICNIRP utilizou em sua Diretriz o modelo de laço (loop), diretamente da Lei de Faraday, enquanto o IEEE em sua Norma utilizou um modelo de indução elíptico para associar o campo elétrico *in situ* com o campo externo.

Diferente visão foi adotada na Diretriz da ARPANSA, onde se utilizou os dados provenientes de sofisticado modelo do corpo humano com resolução de aproximadamente 2 mm [10].

Na TABELA 2.2 são mostrados os valores dos Níveis de Referência das principais Diretrizes de exposição para a freqüência industrial (60 Hz) e de que forma ocorre a sua variação no espectro de freqüência de interesse do trabalho.

TABELA 2.2: Níveis de Referência – 60 Hz

Instituição	Ocupacional		Público geral	
	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (mG)	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (mG)
ICNIRP	8,33	4170	4,17	833
IEEE	20,0	27100	5,0	9040
ARPANSA	8,33	5000	4,17	1000

TABELA 2.2: Continuação (faixa de freqüências)

Instituição	Ocupacional		Público geral	
	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (mG)	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (mG)
ICNIRP	500/f	$25 \times 10^3/f$	250/f	$5 \times 10^3/f$
IEEE	20,0	27100	5,0	9040
ARPANSA	500/f	5000	250/f	1000

Deve-se ressaltar, no entanto, que a validade das relações mostradas na TABELA 2.2 está restrita às faixas de freqüência indicadas na TABELA 2.3.

TABELA 2.3: Faixas de freqüência

Instituição	Campo Elétrico	Campo Magnético	Campo Elétrico (ocupacional)	Campo Magnético (ocupacional)
ICNIRP	25 - 800 Hz	25 - 800 Hz	25 - 820 Hz	25 - 820 Hz
IEEE	1 – 368 Hz	20 - 759 Hz	-	-
ARPANSA	25 – 3 kHz	20 – 180 Hz	-	-

Conforme será visto, as faixas de freqüência estão delimitadas pela transição dos efeitos adversos, sendo adotado para cada faixa o critério mais restritivo, ou seja, o que apresenta o menor limiar.

Embora os níveis de referência consistam em uma ferramenta que permite uma imediata verificação do atendimento dos critérios de exposição, deve-se ressaltar que as Diretrizes impõem fundamentalmente o controle das restrições básicas. E uma vez que os níveis de referência são derivados a partir das restrições básicas utilizando-se modelos dosimétricos aproximados e situações críticas de exposição (acoplamento máximo entre o campo e o modelo), o não atendimento a estes níveis não garante que as restrições básicas e consequentemente os requisitos de exposição não estejam sendo respeitados. Portanto em geral se considera que os níveis de referência são mais conservativos que as restrições básicas originais.

A descrição em detalhes dos modelos dosimétricos adotados nas principais diretrizes assim como a evolução das técnicas de dosimetria serão apresentados no Capítulo 3.

2.6.3 Restrições básicas

As restrições básicas referem-se a limitações de forças elétricas dentro de tecidos biológicos que apropriadamente evitam efeitos adversos. Tais restrições são originadas considerando adversidade de limiares elétricos, sua distribuição entre a população e fatores de segurança.

As Normas da ICNIRP, IEEE e ARPANSA possuem restrições básicas em tecidos (*in tissues*) para evitar fosfenos (magnetofosfenos e eletrofosfenos) na retina e a estimulação de nervos periféricos. A sensação dos fosfenos visuais se assemelha ao efeito quando se pressiona o globo ocular e passa-se a enxergar luzes brancas.

Na TABELA 2.4 são mostrados os valores das restrições básicas das principais Diretrizes de exposição para a freqüência industrial (60 Hz), em termos das grandezas físicas (densidade de correntes e campo elétrico) empregadas originalmente. Posteriormente para comparação estes valores foram postos em uma base comum, em termos de campo elétrico, relacionando-os através da Lei de Ohm:

$$J = \sigma E \quad (2.2)$$

onde,

J é a densidade de corrente;

E é o campo elétrico;

σ é a condutividade elétrica.

TABELA 2.4: Restrição Básica – 60 Hz

Instituição	Ocupacional		Público geral	
	Cabeça	Restante do corpo	Cabeça	Restante do corpo
ICNIRP	10 mA/m ²	10 mA/m ²	2 mA/m ²	2 mA/m ²
IEEE	53,1 mV/m	37,6 mV/m	17,67 mV/m	37,6 mV/m
ARPANSA	30 mV/m	200 mV/m	6 mV/m	6mV/m

TABELA 2.4: Continuação (Restrição Básica ICNIRP convertida com $\sigma = 0.2 \text{ S/m}$)

Instituição	Ocupacional (mV/m)		Público geral (mV/m)	
	Cabeça	Restante do corpo	Cabeça	Restante do corpo
ICNIRP	50	50	10	10
IEEE	53,1	37,6	17,67	37,6
ARPANSA	30	200	6,0	6,0

Conforme pode ser verificado na FIGURA 2.7, apesar das Normas da ICNIRP, IEEE e ARPANSA possuírem restrições básicas em tecidos (*in tissue*) a dependência com a freqüência destas três abordagens é diferente.

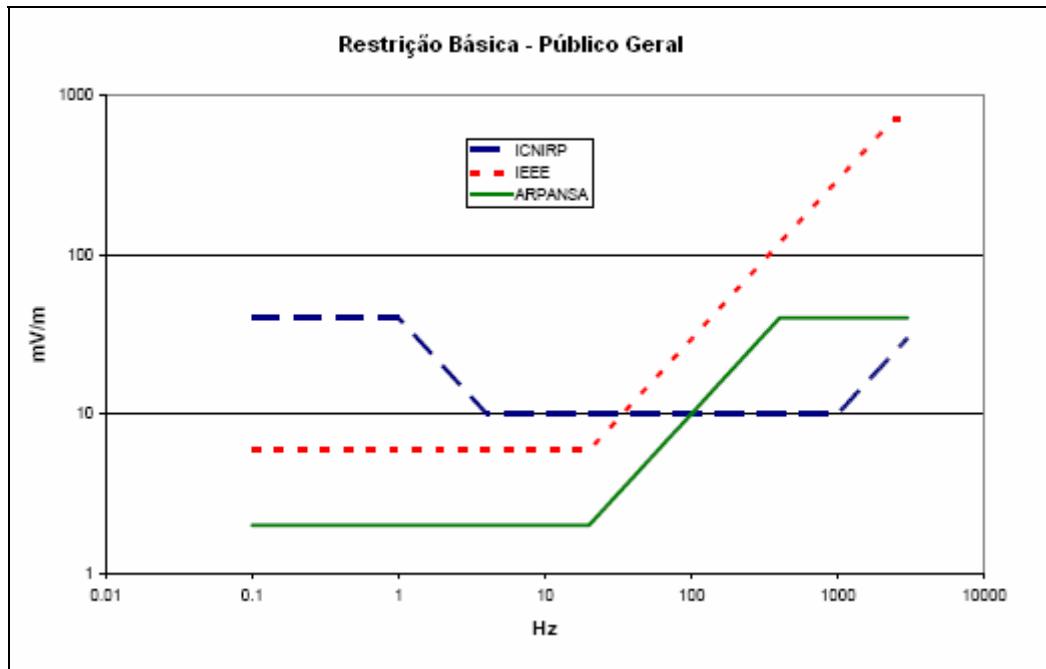


FIGURA 2.7: Restrição Básica sobre a faixa de freqüência [7]

No desenvolvimento das restrições básicas foram usados diferentes critérios para as várias freqüências e situações de exposição, em que para cada faixa de freqüência foi utilizado o critério mais restritivo [25].

A Diretriz da ICNIRP assume que a freqüência crítica para os efeitos relacionados aos eletrofotofenos é 1.000 Hz (início da proporcionalidade dos limiares com freqüência), diferentemente dos 20 Hz assumido na Norma do IEEE. Além disso, assume que estas reações incluem também a coluna espinhal resultando em menores valores de restrições básicas a partir da freqüência de 35 Hz.

Considerando a falta de resultados em que sugeram efeitos observáveis da estimulação da coluna espinhal nos níveis atribuídos aos limiares da sinapse, a Norma do IEEE se restringe a relacionar somente ao cérebro os efeitos sinápticos.

Capítulo 3

Dosimetria

3.1 Introdução

A dosimetria de campos eletromagnéticos define a relação entre ambiente de exposição e as quantidades elétricas induzidas no corpo, ou seja, possui como principal objetivo o de estabelecer a relação entre o campo externo sem-perturbação e os campos e correntes internos [17].

Para campos de baixa freqüência estas quantidades incluem campo elétrico e densidade de corrente nos tecidos. Uma vez que medir tais grandezas no interior do corpo é impraticável, a interação entre a exposição destes campos com o corpo humano pode ser entendida melhor através de modelagem.

Sendo assim a dosimetria serve a três propósitos:

- Identificar cenários de exposição para os quais um dado limiar (restrição básica, em geral) é superado;
- Estimar as quantidades associadas a um efeito documentado;
- Avaliar a possibilidade de efeitos biológicos.

A avaliação da segurança à exposição a CEM é feita através do controle das correntes e campos induzidos no organismo. Uma vez que essas grandezas são fortemente influenciadas pela geometria e pelas propriedades elétricas das várias regiões que compõe o corpo humano (órgãos e tecidos), para que um modelo dosimétrico seja capaz de representá-lo com fidelidade, também deve retratar esses parâmetros o mais próximo possível da realidade.

3.2 Revisão de modelos de dosimetria

3.2.1 Experimentos práticos

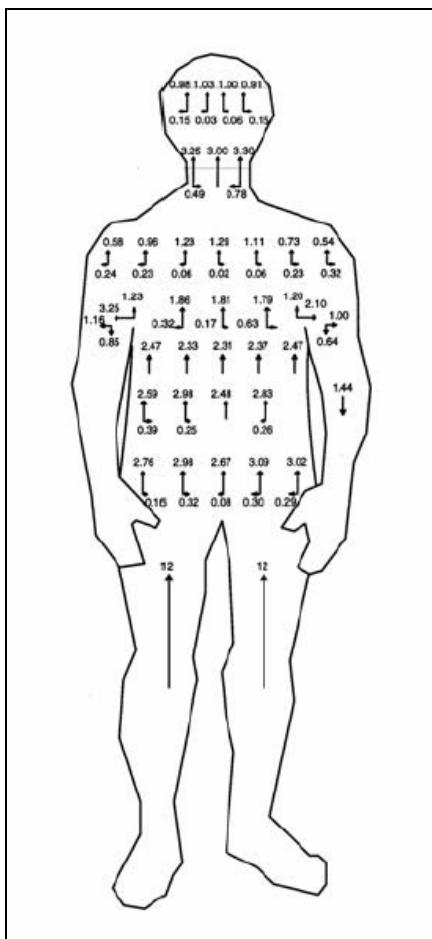
Uma alternativa bastante empregada no início da dosimetria, pela impossibilidade de se medir as correntes induzidas em organismos vivos, consistiu na realização de experimentos práticos, utilizando manequins (*phantom* ou *manekin*) que representassem o corpo humano tanto em sua geometria quanto em algumas de suas propriedades elétricas (comportamento altamente condutivo em baixas freqüências).

Posteriormente esses experimentos ofereceram um importante balizamento e validação para os modelos de cálculo mesmo que reconhecidas as suas limitações.

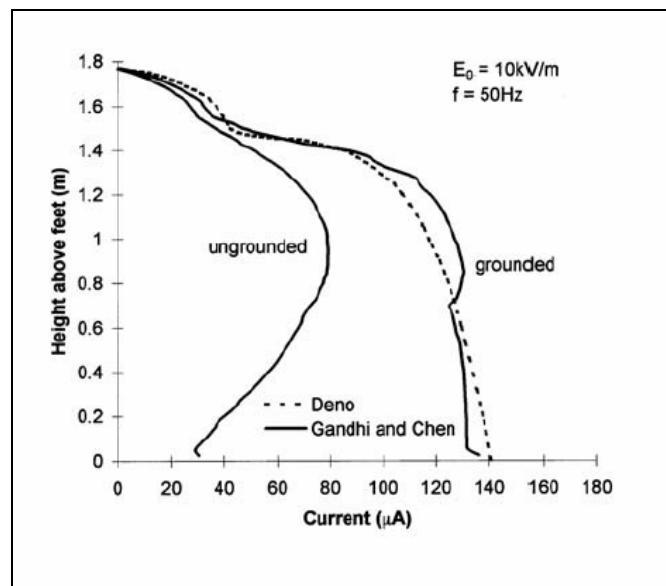
Na seqüência são descritos os dois principais experimentos práticos utilizados como balizamento para os modelos dosimétricos:

- Utilizando um manequim com uma solução salina em seu interior com condutividade igual à condutividade média dos tecidos humanos, a experiência realizada por [26] apresentou como resultado a distribuição de correntes induzidas em um corpo submetido a um campo elétrico vertical;
- No experimento realizado por [22] foi utilizado um manequim equivalente ao corpo humano, composto por um material isolante, porém revestido com um material condutivo (folha de cobre) e submetido a um CE uniforme, onde monitorou-se as correntes em várias seções do modelo.

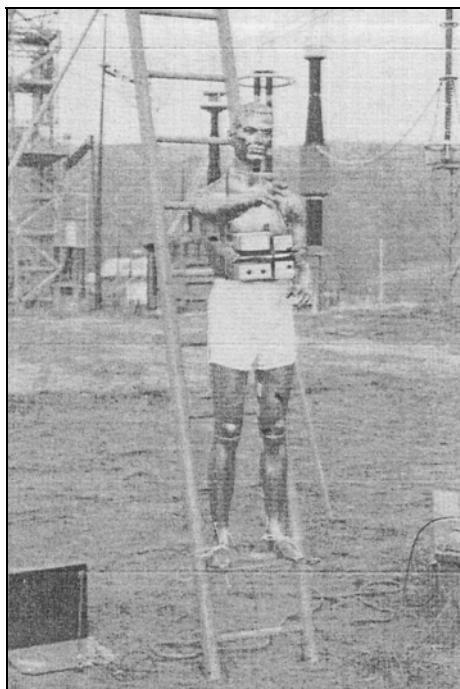
Os resultados das medições do experimento de [26] e [22] estão apresentados na FIGURA 3.1 na forma de densidades de correntes induzidas (mA/m^2). O experimento de [22] mostrado na FIGURA 3.1c foi conduzido com o manequim aterrado por ambos os pés, exposto a um campo elétrico vertical de intensidade de 10 kV/m e freqüência de 60 Hz. As FIGURAS foram retiradas de [17].



(a)



(b)



(c)

FIGURA 3.1: Resultados dos experimentos práticos de [26] na FIGURA 3.1a, de [22] na FIGURA 3.1b e a montagem do experimento de [22] na FIGURA 3.1c

3.2.2 Histórico e evolução dos modelos

Nas primeiras diretrizes foram utilizados modelos muito simples para estimar tanto o campo elétrico induzido quanto a densidade das correntes induzidas resultante da exposição a campo magnético. Nas Diretrizes da ICNIRP, as densidades das correntes induzidas resultante da exposição a campo magnético foram calculadas usando um modelo de laço (loop) diretamente da Lei de Faraday para representar o corpo humano.

O recente progresso na capacidade computacional (processamento e armazenamento de informação) e a eficiente implementação dos métodos numéricos têm permitido o desenvolvimento de sofisticados modelos heterogêneos do corpo humano de alta resolução.

Entretanto, o IEEE em sua Norma decidiu utilizar um modelo de indução elíptico para associar o campo elétrico *in situ* com o campo magnético externo, por considerar que os resultados apresentados pelos modelos computacionais ainda não eram satisfatórios. Uma vez que a comparação entre os cálculos de campo elétrico induzido obtido por diversos pesquisadores usando tanto modelos detalhados e anatomicamente realísticos quanto técnicas numéricas similares, colocaram em dúvida a sua utilização, por mostrarem diferenças superiores a 5:1 no campo máximo em órgãos críticos. Quanto ao campo médio, este foi considerado razoavelmente consistente, embora diferenças 2:1 fossem notadas.

Uma vez que as restrições básicas adotadas nesta Norma dependem do campo máximo em determinados órgãos, as discrepâncias entre os resultados, em especial a dos valores máximos do campo e a falta de validação de um modelo de alta resolução (comparação com experimentos práticos), inviabilizaram a utilização destes modelos detalhados.

O modelo do IEEE apresenta geometrias elípticas representativas das regiões da cabeça e do tronco (dimensões equivalentes aos de um indivíduo grande), com valor de condutividade elétrica única (valor médio), e considerando o módulo e a fase relativa do campo constante sobre as dimensões do corpo.

Uma diferente visão foi adotada na Diretriz da ARPANSA, que utilizou dados provenientes de um sofisticado modelo do corpo humano com resolução de aproximadamente 2 mm [8], nos quais os valores do campo elétrico induzido foram calculados considerando a condição de um campo magnético externo uniforme, decomposto em três direções perpendiculares ao modelo em posição ereta. Esta diretriz em suas conclusões considera que atualmente a modelagem dosimétrica é um importante elemento em seu desenvolvimento, uma vez que sua evolução fez-se a tal ponto que se tem certeza de sua precisão.

Deve-se destacar que os modelos simplificados de cálculo embora pareçam obsoletos permanecem sendo utilizados para comparação e verificação dos métodos numéricos.

Na FIGURA 3.2 são apresentados os chamados modelos analíticos simplificados para exposição a campo magnético.

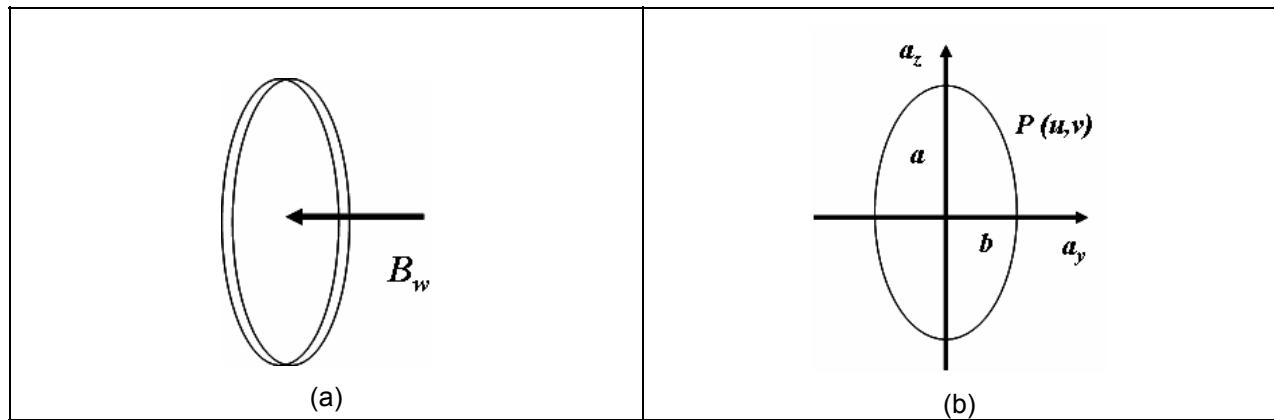


FIGURA 3.2: Modelos simplificados para exposção a campo magnético, laço na FIGURA 3.2a e elíptico na FIGURA 3.2b.

Estes modelos simplificados das Diretrizes do IEEE e ICNIRP são descritos matematicamente da seguinte forma para exposição a campo magnético.

- **Modelo elíptico (IEEE)**

Este modelo de indução magnética representa geometricamente uma seção transversal do corpo como uma elipse, podendo ser aplicado em situações em que o comprimento de onda do campo é muito maior que as dimensões do corpo. Uma expressão geral para o campo elétrico induzido devido à incidência de um campo magnético que é constante em módulo e fase sobre a elipse, é apresentada na Equação (3.1)

$$E = - \frac{dB_w}{dt} \left| \frac{a^2 u a_v - b^2 v a_u}{a^2 + b^2} \right| \quad (3.1)$$

Onde, a_u e a_v são vetores unitários ao longo dos eixos menor e maior da elipse, respectivamente, (a , b) são os eixos menor e maior, respectivamente, (u , v) é o ponto de cálculo dentro da área exposta, e B_w é a taxa de variação temporal da densidade de fluxo magnético na direção perpendicular da seção transversal. Os pontos (u , v) são escolhidos de tal forma que representem a pior condição de exposição.

Considerando que o círculo é um caso particular da elipse, na condição em que os eixos menores e maiores desta são iguais:

$$a = b = R \quad (3.2)$$

Realizando-se a substituição da Equação (3.2) na Equação (3.1) chega-se ao modelo utilizado pela ICNIRP.

- **Modelo circular – Loop (ICNIRP)**

Este modelo representa a exposição de uma amostra de tecido isotrópico de condutividade homogênea a uma densidade de fluxo magnético (B), admitindo que a máxima corrente induzida circule através de um caminho condutivo fechado (laço com raio externo R). Nestas circunstâncias o campo elétrico induzido pode ser representado aproximadamente pela Equação (3.3)

$$E = -\frac{dB}{dt} \times \frac{1}{2} r \quad (3.3)$$

- **Técnicas Analíticas (1970)**

Os primeiros modelos dosimétricos tentavam representar o corpo humano como um sólido de revolução, homogêneo, adaptando esses problemas às soluções analíticas de geometrias esféricas, cilíndricas e elípticas. A FIGURA 3.3 apresenta estes modelos geométricos em três dimensões.

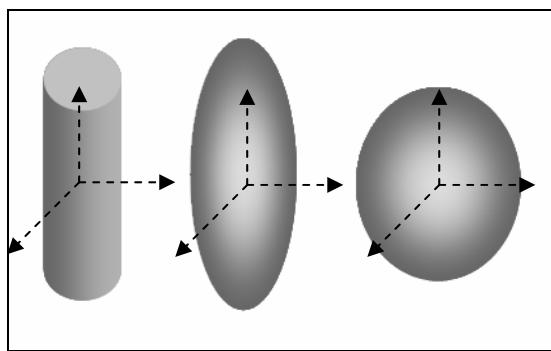


FIGURA 3.3: Modelos geométricos em 3D (Cilíndrico, elíptico e esférico)

Para exemplificar a utilização de técnicas analíticas, as Equações (3.4), (3.5) e (3.6) representam a solução do problema de exposição a campo magnético, sendo o corpo humano representado por uma geometria elíptica, supondo que as três componentes de campo

magnético estão alinhadas às direções dos eixos de coordenadas, e o eixo maior do elipsóide por sua vez encontra-se alinhado ao eixo vertical z.

$$E_1 = -\frac{dB_x}{dt} \left| \frac{a^2 ya_z - b^2 za_y}{a^2 + b^2} \right| \quad (3.4)$$

$$E_2 = -\frac{dB_y}{dt} \left| \frac{-a^2 xa_z + b^2 za_x}{a^2 + b^2} \right| \quad (3.5)$$

$$E_3 = -\frac{dB_z}{dt} \left| \frac{ya_x - xa_y}{2} \right| \quad (3.6)$$

onde, E_1 , E_2 , E_3 representam as componentes do campo elétrico induzido considerando a exposição ao campo magnético nas direções dos eixos x, y e z, respectivamente.

Pode se observar que para o campo magnético orientado na direção do eixo maior da elipse a solução é idêntica a da esfera.

- Métodos Numéricos

As soluções analíticas estão limitadas a um número limitado de geometrias, e de formatos simplificados. Caso o interesse seja o de modelar, por exemplo, a cabeça considerando as suas regiões com diferentes valores de condutividade, esta poderia ser representada como composta por várias esferas concêntricas.

O resultado fornecido por essa aproximação apesar de fornecer um indicativo de ordem de grandeza da corrente ou do campo elétrico induzido não estaria representando a heterogeneidade da região.

Para retratá-la o mais próximo possível da realidade, evitando-se ter que compatibilizar a complexidade geométrica do corpo humano com os recursos analíticos disponíveis, desenvolveu-se a dosimetria computacional.

A dosimetria computacional consiste em calcular o campo elétrico e densidades de correntes induzidas no interior do corpo através da solução numérica das Equações de Maxwell em modelos anatomicamente realísticos de alta-resolução, do corpo humano [26].

O desenvolvimento destes modelos heterogêneos se tornou expressivo nos últimos anos influenciados por dois importantes fatores:

1. A disponibilidade de imagens médicas de diversas regiões do corpo ofertadas pelo projeto Ser Humano visível (Visible Human Project), que segmentadas com o auxílio de programas de tratamento de imagens [28], tem permitido a diferenciação de mais de 35 tipos de tecidos e órgãos em alta-resolução (5 mm);

O Projeto Ser Humano Visível (Visible Human Project) foi criado pelo National Library of Medicine dos E.U.A, iniciado em 1989, em parceria com Centro de Ciências da Saúde da Universidade do Colorado, com o objetivo inicial de criar uma base de imagens digitais de cadáveres de um homem e de uma mulher completos, a partir de cortes anatômicos transversais, tomografias de raios X (CT SCAN) fresco e congelado e de ressonância magnética (MRI), tomadas no mesmo plano.

Na FIGURA 3.4 é mostrada uma imagem de uma seção da cabeça disponibilizada por esse projeto.



FIGURA 3.4: Fotografia de uma seção transversal da região da cabeça, à esquerda, e imagens de ressonância magnética (MRI) à direita, e de tomografia computadorizada (CT SCAN) ao centro.

2. O recente progresso nos métodos numéricos e na capacidade computacional, permitindo a solução de problemas de grande porte envolvendo milhões de variáveis, em estações de trabalho ou pequenos clusters de computadores.

Os métodos numéricos atualmente utilizados nas simulações de exposição variam desde métodos da equação integral, passando por técnicas de diferenças finitas até o método dos elementos finitos. Os detalhes dos métodos serão vistos na próxima seção, onde se ressalta através da comparação entre a eficiência destes, a estreita relação entre a escolha do método e as características do problema a ser resolvido.

Para ilustrar esta evolução da dosimetria computacional são apresentados na FIGURA 3.5 o modelo proposto por [29] baseado no método da impedância, cuja geometria apesar de formada por elementos de volume não foi derivada de imagens médicas, e o modelo proposto por [30] baseado no Método de Diferenças Finitas no domínio do tempo, cuja geometria foi construída através de imagens de ressonância magnética, com resolução de 1 mm em seus elementos de volume. As figuras foram retiradas de [31].

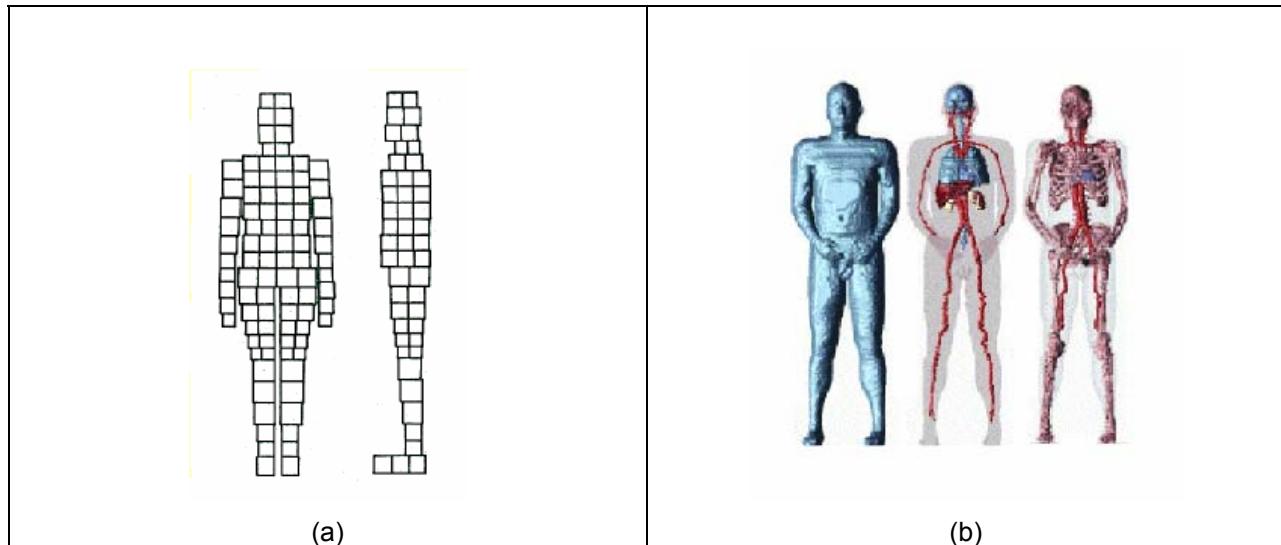


FIGURA 3.5: Modelo dosimétrico proposto por [29] na FIGURA 3.5a, e na FIGURA 3.5b o modelo proposto por [30].

Deve-se ressaltar que, devido à complicada estrutura do corpo humano, formado por órgãos com dimensões variadas e formas geometricamente complexas, todos exibindo diferentes propriedades elétricas, as técnicas computacionais devem apresentar uma refinada resolução espacial para que sejam alcançados resultados tão precisos quanto possível.

A dificuldade na representação de formas anatomicamente complexas pode ser parcialmente ultrapassada pela representação de tecidos por elementos de volume bem pequenos. Porém, os esforços computacionais e requisitos de memória definem os limites práticos para o tamanho dos elementos de volume (voxel) quando se deseja representar grandes volumes de tecido.

3.3 Dosimetria computacional e os métodos numéricos

A descrição dos fenômenos do eletromagnetismo assim como da maioria dos fenômenos físicos, resulta em um sistema de equações diferenciais ordinárias em derivadas parciais, válidas em certa região (domínio) e submetidas a condições de contorno.

Os métodos numéricos surgiram como alternativa para resolução desses problemas, em muitos casos extremamente complexos, em que para obtenção de uma solução analítica seriam necessárias diversas simplificações.

Conforme mencionado na seção anterior, diversos métodos computacionais têm sido usados para o cálculo de correntes e campos elétricos induzidos em modelos do corpo humano, destacando-se o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos e o método dos momentos, tendo cada um deles apresentando vantagens e desvantagens em sua utilização.

A escolha do método numérico depende do tipo de equações das quais se pretende encontrar uma solução aproximada, e sua aplicação a determinado problema está relacionada ao tipo de exposição a ser simulada, se a campo magnético ou a campo elétrico, uniformidade ou não dos campos, do tamanho e formato dos objetos a serem modelados, da resolução da modelagem, e consequentemente o tamanho dos elementos de volume, da eficiência computacional, e dos requisitos de memória.

No caso específico dos estudos de avaliação de exposição a campos elétricos e magnéticos na faixa de freqüência extremamente baixa, são permitidas algumas aproximações sem que haja, contudo, perda na precisão dos resultados. Estas simplificações são:

- Considerar a independência entre campo elétrico e o campo magnético, o que permite tratá-los separadamente;
- O cálculo dos campos gerados pela linha de transmissão, por exemplo, é obtido diretamente das correntes e cargas dos condutores;
- Exceto durante o uso de utensílios elétricos, a população em geral, está longe das fontes de campo. Isso permite que se considerem os campos como sendo uniformes;
- Pelo fato do corpo humano ser altamente condutivo em freqüências extremamente baixas, considera-se a apenas a condutividade dos tecidos;
- Despreza-se a influência da corrente de deslocamento já que esta é, em módulo, da ordem de 10^4 vezes menor que o módulo da corrente induzida.

Estas considerações exercem influência direta na formulação do problema e, portanto, determinam a utilização de métodos de solução diferentes para a exposição a campo elétrico daqueles utilizados para exposição a campo magnético.

3.3.1 Campo elétrico

Para o cálculo da exposição a campos elétricos é importante considerar a perturbação que o corpo humano provoca ao campo externo. É necessário considerar um domínio maior para o problema, em geral três vezes a dimensão do corpo em cada direção, necessitando-se assim de maior espaço computacional para a obtenção de uma solução satisfatória.

Pode ocorrer superação dos recursos computacionais em situações em que seja utilizada uma discretização de grande resolução no interior do modelo do corpo humano e se queira utilizar a mesma resolução externamente.

Para exposição a um campo elétrico uniforme têm sido utilizados os seguintes métodos: método das diferenças finitas, método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), o quase estático FDTD e o método híbrido.

No método das diferenças finitas no domínio da freqüência (FD) o volume requerido no cálculo deve incluir o campo externo perturbado, um espaço que é no mínimo três vezes a dimensão do corpo em cada direção. Atualmente com a grande disponibilidade de computadores, uma modelagem de alta-resolução pode ser feita em apenas algumas etapas, usando *nested sub-grids* e interpolação.

O método FDTD é computacionalmente eficiente, porque o volume computacional está limitado a uma caixa envolvendo o modelo, sendo necessários poucos elementos de volume (*voxels*) de ar adicionais. Além disso, não requerer inversões de matrizes.

O método FDTD tem sido aplicado em 10 MHz e os resultados são posteriormente escalonados para 60 Hz. Os cálculos foram feitos para uma onda plana com impedância de onda de 377Ω .

O método FDTD quase estático pode ser hibridizado com o método SPFD (*scalar-potential-difference-finite*). No SPFD o espaço computacional está limitado à região condutiva. No método híbrido, a densidade superficial de carga calculada como FDTD para cada voxel na superfície modal é interpolada para um fino quadriculado. A principal vantagem do método híbrido é melhorar a eficiência computacional e a precisão.

A TABELA 3.1 relaciona as vantagens e desvantagens dos métodos mais utilizados em modelos dosimétricos:

TABELA 3.1: Comparação entre métodos numéricos

Método Numérico	Vantagens	Desvantagens
Método dos Momentos	Problemas com superfícies condutivas.	Inversão de matrizes Dificuldade de aplicação em problemas com permissividade.
Método das Diferenças Finitas	Compatibilidade com os dados de modelos anatômicos.	É escalável, ou seja, o tempo computacional se comporta linearmente no problema de tamanho N. Necessita de grande espaço computacional.
Método dos Elementos Finitos	Malha não-uniforme (<i>More conformal mesh</i>).	Escala como N^3 . Não há modelos detalhados do corpo humano disponíveis atualmente.

A escalabilidade se refere à eficácia de um algoritmo paralelo na utilização de processadores adicionais. Um algoritmo é denominado escalável em função do aumento do número de processadores se sua eficiência pode ser mantida constante (ou no mínimo limitada acima de zero) pelo aumento do tamanho do problema. Um algoritmo escalável neste sentido poderia, no entanto, não ser prático se a taxa de aumento do tamanho do problema resulta em tempo total de execução inaceitável [32].

3.3.2 Campo magnético

Para a exposição a campo magnético é importante considerar que não existe perturbação do campo externo pelo corpo humano, uma vez que as linhas de fluxo penetram no corpo humano sem atenuação de forma similar ao que ocorre na propagação no ar. Por isso, em geral, adota-se para o modelo o valor de permeabilidade magnética relativa igual a um, e pode-se considerar um domínio menor para o problema. Com isso o espaço computacional necessário pode ser limitar a uma pequena região envolta do modelo (box), ou mesmo delimitada pelo seu próprio volume.

Os primeiros cálculos de densidades de correntes dentro do corpo humano foram feitos utilizando modelos formados por elementos de volume (voxel) semi-realísticos, usando o método da impedância, realizados por [29].

No método de impedâncias uma malha tridimensional de impedâncias (resistências) representa todos os elementos de volume (*voxel - volumetric pixel*). Para cada face de cada voxel do corpo, tensões de Kirchhoff são igualadas à força eletromotiva (fem) produzida pela variação de fluxo magnético normal à superfície do laço. O sistema de equações formado pelas correntes de laço é resolvido iterativamente através do método de sobre relaxação sucessiva. Para cada laço, são calculadas as correntes de linha ou densidade de corrente na direção das três coordenadas.

Para a exposição a campo magnético têm sido utilizadas diferentes implementações para o método das diferenças finitas.

Mais recentemente foi introduzida a técnica de diferenças finitas com potencial escalar (scalar potential finite-difference - SPFD) introduzida por [30], onde as fontes de campo são representadas por um vetor potencial magnético e o domínio é discretizado com o método das diferenças finitas.

As equações para as componentes do campo elétrico em cada voxel são derivadas diretamente das equações de Maxwell, e o conjunto resultante de equações é resolvido usando o método do gradiente conjugado. As componentes de campo elétrico (E_x , E_y , E_z) são definidas nos centros dos voxels.

A comparação feita por [33] indicou que a principal diferença entre o método SPFD e o método da impedância além do fato, é claro, que o primeiro é um método escalar e o segundo um método vetorial, reside em sua eficiência computacional, com o SPFD necessitando para o mesmo tamanho de voxel de 14% menos de memória e seu tempo computacional é entre 1,5 e 11 vezes menor que o método da impedância.

A TABELA 3.2 relaciona as vantagens e desvantagens dos métodos mais utilizados em modelos dosimétricos:

TABELA 3.2: Comparação entre métodos numéricos

Método Numérico	Vantagens	Desvantagens
Método dos Momentos		Inversão de matrizes. Limitado a sistemas com menos de 10^6 células.
Método dos Elementos Finitos	Malha não-uniforme <i>(More conformal mesh)</i> .	Malha irregular dificulta uma paralelização eficiente. Absorção de condições de contorno. Não há modelos detalhados do corpo humano disponíveis atualmente.
Método das Diferenças Finitas	Compatibilidade com os dados de modelos anatômicos.	Compatibilidade com os dados de modelos anatômicos.
Método das Diferenças Finitas No domínio do tempo	Estrutura retangular de células permite fácil paralelização. Compatibilidade com os dados de modelos anatômicos.	Resolução do objeto. Absorção de condições de contorno.
Método das Diferenças Finitas Com potencial escalar	Pode ser usado para campos magnéticos não-uniformes	
Método da Impedância	Pode ser usado para campos magnéticos não-uniformes.	

No APÊNDICE D é feita a descrição do MEF, destacando-se aspectos ligados à eficiência do método. Estão presentes também neste apêndice as descrições das funcionalidades dos programas utilizados nas simulações, os Programas PHENIX e MEGA.

Capítulo 4

Pesquisa das propriedades elétricas do corpo humano

4.1 Introdução

A avaliação da segurança à exposição a campos elétricos e magnéticos é feita através do controle das correntes e campos induzidos no organismo. Uma vez que essas grandezas são fortemente influenciadas pela geometria e pelas propriedades elétricas das várias regiões (órgãos e tecidos) que compõem o corpo humano para que um modelo dosimétrico seja capaz de representá-lo com fidelidade, também deve retratar esses parâmetros o mais próximo possível da realidade.

Enquanto o desenvolvimento geométrico dos modelos têm sido expressivo nos últimos anos, com a publicação de um grande volume de trabalhos [17], permitindo a representação de mais de 35 tipos de tecidos e órgãos do corpo humano, os valores de condutividade e permissividade adotadas nos modelos são baseados fundamentalmente nos trabalhos publicados por [34 – 36]. Percebe-se através da quantidade de publicações um desequilíbrio entre o desenvolvimento geométrico dos modelos e a realização de pesquisas de identificação das propriedades elétricas de tecidos e órgãos [17].

No entanto, discute-se atualmente, se os valores para as constantes elétricas de tecidos e órgãos indicadas neste trabalho por terem sido obtidas em experimentos com amostras de tecidos de animais mortos difeririam das constantes elétricas dos tecidos *in vivo*. Além disso, observa-se a existência de uma lacuna nos valores disponíveis na literatura para a constante de permissividade dos tecidos na freqüência industrial.

Neste capítulo é apresentada uma proposta de metodologia que permite inferir a constante de permissividade aproximada do corpo humano, baseada fundamentalmente na análise da perturbação que o corpo provoca no campo elétrico externo.

4.2 Propriedades dielétricas dos tecidos biológicos

As propriedades dielétricas por determinarem os caminhos de circulação de corrente através dos tecidos, representam dados de entrada cruciais para as simulações de campos eletromagnéticos no corpo.

Destacam-se como duas importantes contribuições na identificação das propriedades elétricas de tecidos biológicos os trabalhos publicados em [37] e [34 – 36].

O modelo proposto em [37], baseia-se na teoria da dispersão para descrever a permissividade complexa do tecido biológico. Este modelo foi posteriormente estendido por diversos autores [34 – 36] e [38].

O modelo proposto em [34 - 36], se constitui atualmente na principal referência de valores de propriedades elétricas. Este trabalho publicado em três partes, envolveu revisão da literatura, a inclusão de novos dados medidos e a proposta de aperfeiçoamento de um modelo paramétrico. Os dados de condutividade deste trabalho têm sido largamente utilizados em recentes modelos dosimétricos anatomicamente realísticos.

Na TABELA 4.1 encontram-se reunidos os valores das propriedades elétricas de alguns tipos de tecidos, nas freqüências de 50 Hz e 100 kHz, baseados [34 - 36].

TABELA 4.1:Propriedades elétricas de tecidos humanos

Tecido	50 Hz		100 kHz	
	Condutividade (Sm-1)	Permissividade relativa	Condutividade (Sm-1)	Permissividade relativa
Sangue	0,7	5300	0,7	5100
Gordura	0,020	$1,4 \cdot 10^6$	0,024	93
Pele (seca)	0,0002	1100	0,00045	1100

Percebe-se a forte dependência com a freqüência dos valores de permissividade relativa ao contrário da condutividade que apresenta pouca variação nessa faixa de freqüência.

Deve-se observar que são poucos os dados de propriedades elétricas de tecidos em baixa freqüência disponíveis na literatura devido às dificuldades técnicas na medição das propriedades elétricas em baixa freqüência.

4.3 Variabilidade

Os tecidos biológicos são não-homogêneos e apresentam uma variabilidade na estrutura ou composição, e por fim nas propriedades elétricas.

Uma vez que as propriedades elétricas de um organismo começam a mudar logo após a sua morte, medições *in vivo* são preferíveis em relação aos dados *in vitro*. Infelizmente, medições de órgãos humanos internos *in vivo* são praticamente impossíveis de realizar. Portanto, os dados disponíveis originam-se frequentemente de medições realizadas em animais. As diferenças de propriedades elétricas entre homens e animais não são sistemáticas. É possível também que a variação dentro de uma mesma espécie exceda a variação entre espécies.

Em [34 – 36] relata-se uma dispersão para os valores medidos de $\pm 5 - 10\%$ para faixa superior a 100 MHz, e de $\pm 15 - 25\%$ para a escala inferior de frequência. Identificou como possíveis fontes de erro a escolha da amostra e também o processo de medição.

Recentes pesquisas de [39] concluíram que a variabilidade entre os dados de propriedades elétricas é decorrente de alguns fatores. Tais como:

- Natureza heterogênea dos tecidos biológicos;
- Uso de tecidos provenientes de diferentes espécies (ou de diferentes animais de mesma espécie);
- Idade das amostras quando utilizadas;
- Procedimento de preparação dos tecidos;
- Se os tecidos são anisotrópicos;
- Temperatura da amostra;
- Erros sistemáticos associados com as técnicas de medição usadas.

No entanto a maior fonte de erro pode estar no fato de se utilizar nas medições das propriedades elétricas amostras de tecidos retiradas de animais mortos.

4.4 Medição da constante de permissividade

A incerteza no que se refere ao comportamento dos tecidos humanos na freqüência industrial motivou a realização de uma pesquisa [40] com o objetivo de estimar a permissividade do corpo humano, usando métodos indiretos, através da análise do campo elétrico externo em torno do corpo.

A nova abordagem tem por objetivo principal verificar a influência da utilização de amostras de tecidos retiradas de animais mortos, nas medições diretas das propriedades elétricas.

A fim de conciliar as limitações oriundas das próprias características dos medidores convencionais de campo elétrico ou mesmo de adaptações do processo de medição às situações reais de exposição foram propostos dois métodos [40].

Para a realização da pesquisa foram utilizados os programas computacionais TRICAMP e MEF, desenvolvidos pelo CEPEL, cujas descrições estão contidas no Apêndice C [41].

4.4.1 Primeiro método

As medições práticas de campo elétrico, em sua maioria, são realizadas medindo-se a tensão entre duas placas paralelas e perpendiculares ao campo elétrico. Entretanto, no caso de campos não-uniformes, as partes metálicas causam perturbação do campo em torno do ponto a ser medido, distorcendo os resultados [42]. Conforme dito no Capítulo 1, o campo elétrico é perturbado por qualquer objeto metálico incluindo a presença do próprio operador.

Estas dificuldades de medição se confirmaram quando se tentou utilizar um instrumento convencional para medir o campo elétrico em torno do corpo de um voluntário exposto a um campo elétrico uniforme. A presença do corpo causou perturbação, tornando o campo elétrico próximo ao corpo de difícil medição. Ao campo elétrico original uniforme, sem a presença do voluntário chamou-se de campo não-perturbado (E_0).

Esta dificuldade de medição de campo elétrico ao redor de estruturas com formatos complexos, foi superada por [43], que em seu trabalho publicado em 1989 desenvolveu um sistema de medição especial para visualizar a distribuição espacial de campo elétrico em torno de objetos com geometrias complexas como as estruturas biológicas. Os resultados assim como a metodologia empregada nesse artigo foram utilizados como referência para a realização deste primeiro método.

A constante dielétrica aproximada do corpo humano foi estimada através da razão entre o campo elétrico externo perturbado e campo elétrico não-perturbado (E/E_0), ajustando os resultados da simulação usando o programa de elementos finitos aos valores medidos disponíveis na referência. Este ajuste foi realizado em duas etapas utilizando corpos de diferente complexidade geométrica para uma faixa de valores de permissividade.

1. No primeiro estágio, chamado de caso-teste, um objeto com formato simplificado, especificamente um cilindro, foi modelado e então, a precisão do cálculo numérico, especificamente a modelagem usando o programa de elementos finitos e simplificação geométrica por simetria axial, foi confirmada pela comparação com os resultados da referência;
2. No segundo estágio, depois de confirmada a validade do método, este foi aplicado para o modelo humano em tamanho reduzido, usando uma modelagem por elementos finitos e simetria axial.

4.4.1.1 Resultados

▪ Caso teste-cilindro

Devido à simetria do problema em relação ao eixo vertical utilizou-se na modelagem o recurso de simetria axial vertical (eixo Y). Aplicando-se a simetria de rotação a este problema torna-se necessário apenas a representação da metade do domínio.

A Figura 4.1 mostra a malha bidimensional que foi utilizada nos cálculos, destacando-se a metade do contorno do cilindro, e parte do eixo de simetria vertical e da fronteira inferior.

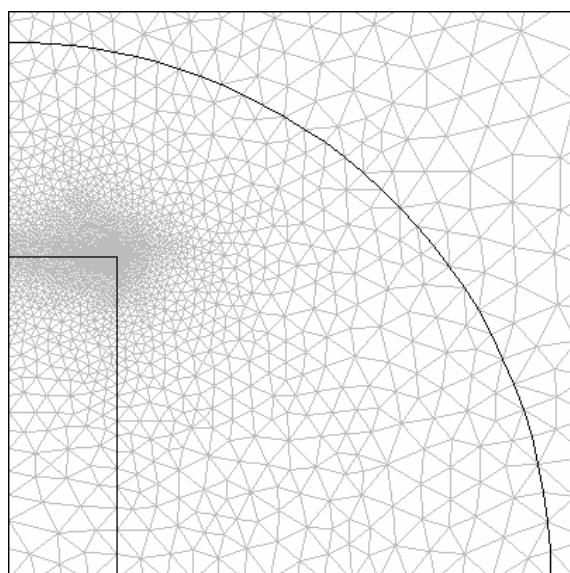


FIGURA 4.1: Malha bidimensional utilizada

Utilizou-se na modelagem as dimensões tanto do domínio (1,3 m de largura e 0,8 m de altura) quanto do objeto (raio do cilindro de 10 cm e altura de 30 cm) semelhante aos indicados na referência.

A razão para considerar-se um domínio amplo foi a de garantir que o campo elétrico próximo das placas fosse uniforme, apesar da perturbação provocada pelo objeto. Isso também permitiu desconsiderar o efeito de borda das placas.

Optou-se por modelar-se um arco de círculo como recurso para contenção da malha, garantindo-se que próximo ao objeto, na região de interesse, obter-se-ia uma boa discretização.

Os valores de potencial adotados foram semelhantes aos indicados na referência, de forma que o campo elétrico não-perturbado (E_0) fosse de 50 kV/m.

Adotou-se as condições de contorno Neumann, fluxo tangencial para as fronteiras laterais do domínio, incluindo o eixo de simetria vertical, e de Dirichlet, potencial constante, para as fronteiras superior e inferior do domínio. Considerou-se o objeto como estando aterrado, ou seja, tendo o potencial zero, e um potencial de 40 kV na tampa superior.

Para este caso foram realizadas simulações através da faixa de valores de permissividade relativa entre 10 e 100.

A Figura 4.2 mostra a distribuição de campo elétrico em torno do cilindro especificamente para o valor de permissividade relativa igual a 30.

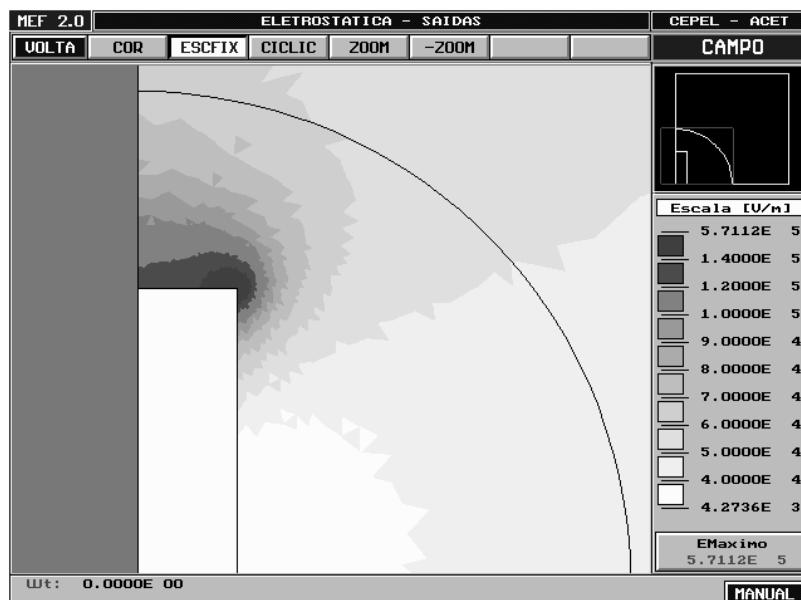


FIGURA 4.2: Distribuição de campo elétrico em torno do cilindro

Conforme esperado identificou-se um campo elétrico de intensidade bastante elevada na região próxima à extremidade superior do cilindro, mesmo tendo-se aplicado um adoçamento nessa extremidade para atenuação desse efeito de ponta.

- **Caso modelo humano**

Para este caso foram realizadas simulações através da faixa de valores de permissividade relativa entre 10 e 50.

A Figura 4.3 mostra a malha bidimensional utilizada nos cálculos, destacando-se a metade do contorno do corpo, e parte do eixo de simetria vertical e da fronteira inferior.

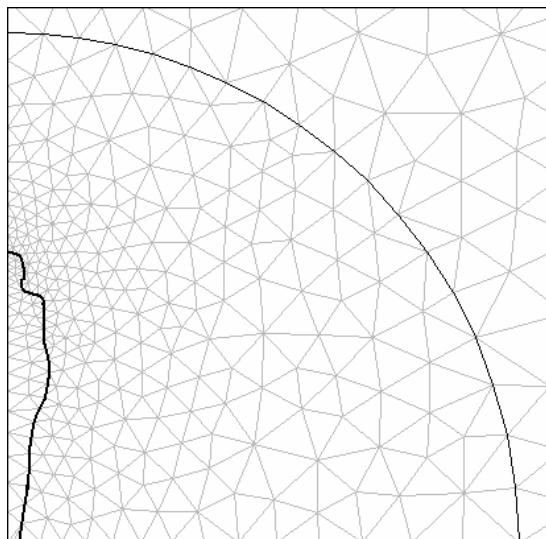


FIGURA 4.3: Malha bidimensional utilizada

Utilizou-se na modelagem as dimensões tanto do domínio (1,3 m de largura e 0,8 m de altura) quanto do modelo humano em tamanho reduzido (altura de 40 cm) semelhante aos indicados na referência.

Da mesma forma que na etapa anterior considerou-se um domínio amplo a fim de garantir que o campo elétrico próximo das placas fosse uniforme, apesar da perturbação provocada pelo objeto. Isso também permitiu desconsiderar o efeito de borda das placas.

Optou-se também por modelar-se um arco de círculo como recurso para contenção da malha, garantindo-se que próximo ao corpo, a região de maior interesse, obter-se-ia uma boa discretização.

Os valores de potencial adotados foram semelhantes aos indicados na referência, de forma que o campo elétrico não-perturbado (E_0) fosse de 20 kV/m.

Adotou-se para o problema as condições de contorno Neumann (fluxo tangencial) para as fronteiras laterais do domínio, incluindo o eixo de simetria vertical, e de Dirichlet (potencial constante) para as fronteiras superior e inferior do domínio. Considerou-se o objeto como estando aterrado, ou seja, tendo o potencial zero, e um potencial de 16 kV na tampa superior.

Para este caso, foram realizadas simulações através da faixa de valores de permissividade relativa entre 10 e 100.

A Figura 4.4 mostra a distribuição de campo elétrico em torno do cilindro especificamente para o valor de permissividade igual a 30.

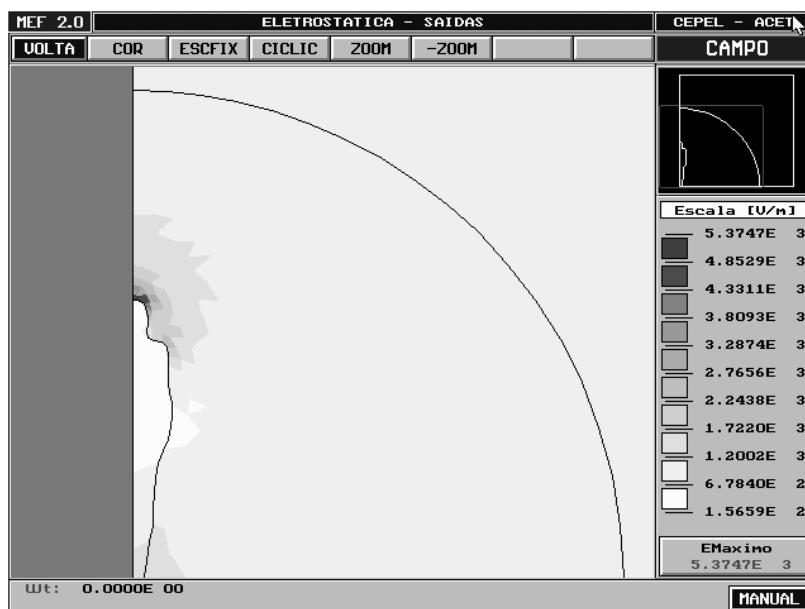


FIGURA 4.4: Mapa de campo elétrico em torno do modelo humano

Nota-se através do mapa que a intensidade de campo elétrico próximo às extremidades do corpo é alta, confirmando os resultados da referência. O alto da cabeça, os ombros e próximo aos pés se destacam como regiões onde ocorre forte concentração de campo elétrico.

4.4.1.2 Conclusões

Os resultados obtidos com esse primeiro método tanto com o cilindro quanto o modelo humano, forneceram faixa de valores de permissividade relativa compreendida entre 30 – 100.

4.4.2 Segundo método

O exato conhecimento do campo elétrico em torno do corpo humano é considerado essencial para a correta caracterização dos valores de permissividade. Entretanto, em situações práticas o primeiro método não é inteiramente adequado, tendo em vista a estrutura necessária para a medição e aquisição dos dados.

A proposta deste segundo método teve por objetivo possibilitar a utilização de medidores convencionais de campo elétrico, embora também sejam necessárias medições próximas ao corpo humano. Este método está baseado no efeito da blindagem, que consiste na redução significativa da intensidade do campo elétrico nas proximidades de uma pessoa de pé, na situação em que esta se encontra distante da fonte emissora.

As medições foram realizadas no Laboratório de Alta Tensão do Cepel (AT1), usando como fonte emissora um arranjo real de uma linha de transmissão de 500 kV, estando a fase central posicionada a uma altura de 10 metros do solo.

4.4.2.1 Resultados

O procedimento utilizado para a medição foi o normalmente seguido pelo Cepel em medições de campo, no interior da faixa de passagem de linhas de transmissão aéreas.

Deve-se considerar como particularidades desta montagem o fato de ter-se energizado apenas a fase central, mantendo-se as fases laterais aterradas (potencial zero) e também a presença e consequentemente a influência na medição das paredes do laboratório.

Posicionou-se um voluntário a uma distância de 8 metros do centro da LT e foram medidos a intensidade de campo elétrico em três perfis transversais, nas alturas de 0,5, 1,0 e 1,4 metros

Posteriormente esse arranjo assim como o esquema de medição foi reproduzido através de modelagem no Programa TRICAMP. Foram representados os condutores de fase do arranjo por tubos metálicos cilíndricos, as paredes e o teto do laboratório como placas metálicas aterradas e o voluntário por um cilindro condutivo também aterrado.

Os resultados experimentais foram então comparados com os dados obtidos na simulação no Programa TRICAMP. Os resultados desta comparação estão na FIGURA 4.5.

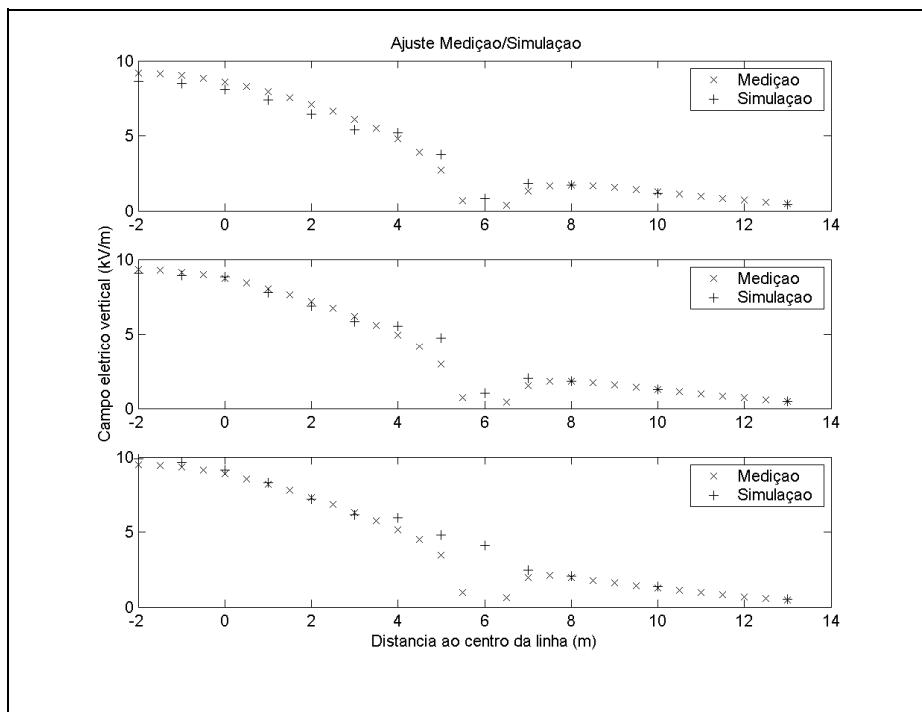


FIGURA 4.5: Comparação entre valores medidos e calculados, utilizando os perfis de 0,5, 1,0 e 1,4 metro, respectivamente

Posteriormente passou-se a investigar a influência da representação do voluntário. Para o perfil de 1,0 m foram calculadas algumas variações do raio do cilindro a fim de definir a melhor representação. Os resultados estão mostrados na FIGURA 4.6.

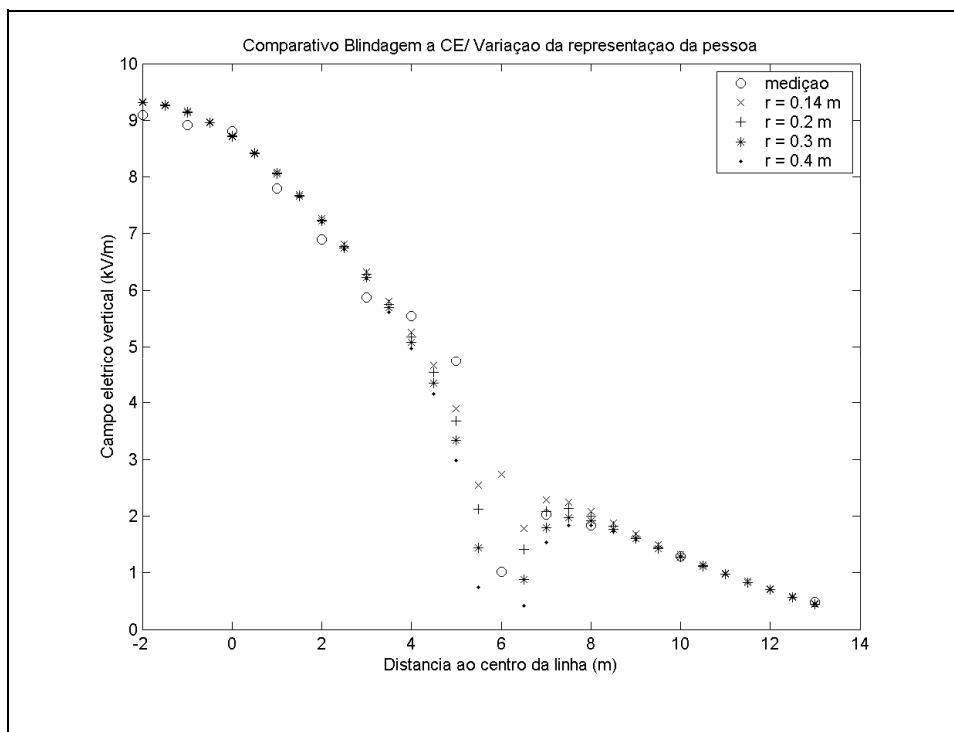


FIGURA 4.6: Influência do raio do cilindro nos valores de campo

Finalmente, as condições de contorno obtidas da simulação no TRICAMP foram utilizadas como entrada das condições de fronteira necessárias para a simulação no programa MEF (elementos finitos). O voluntário foi modelado como um cilindro aterrado de raio igual a 0,4 m, conforme mostrada na FIGURA 4.7.

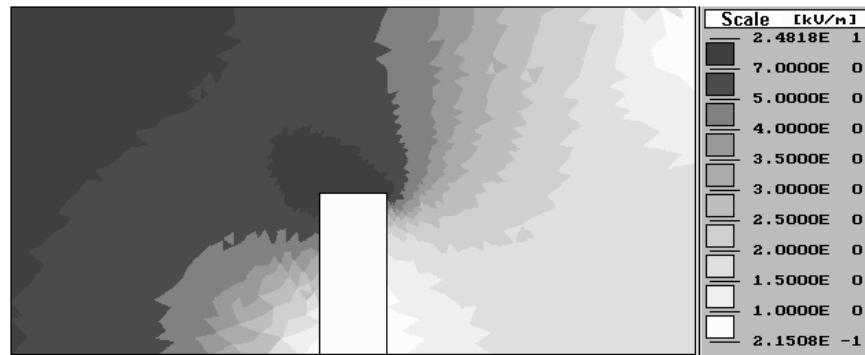


FIGURA 4.7: Distribuição do campo elétrico em torno do cilindro/voluntário

As simulações realizadas compreenderam variação de permissividade relativa sobre a faixa de valores de 30 – 100. O resultado da simulação para o perfil a 0,5 m considerando a representação do corpo por três valores de permissividade relativa está apresentado na FIGURA 4.8

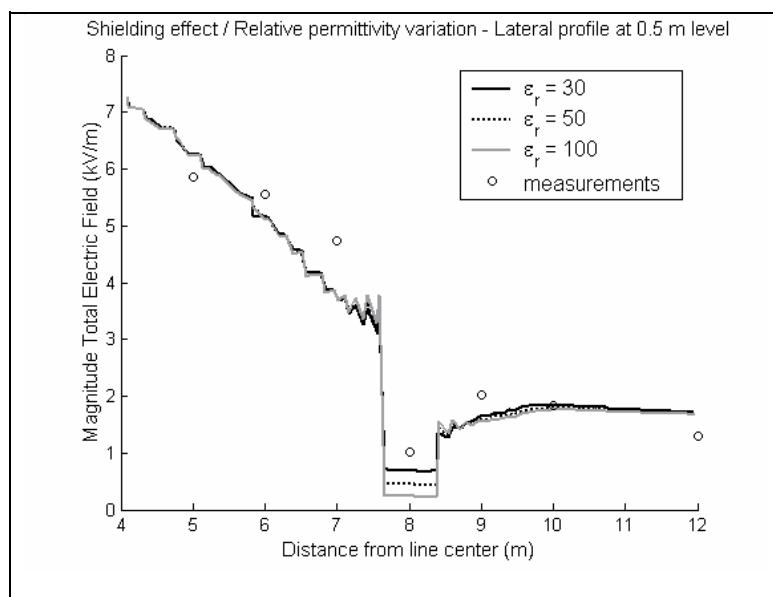


FIGURA 4.8: Comparação dos valores de campo medidos e calculados ao longo do perfil 0,5 m

O resultado da simulação para o perfil a 1,0 m considerando a representação do corpo por três valores de permissividade relativa está apresentado na FIGURA 4.9

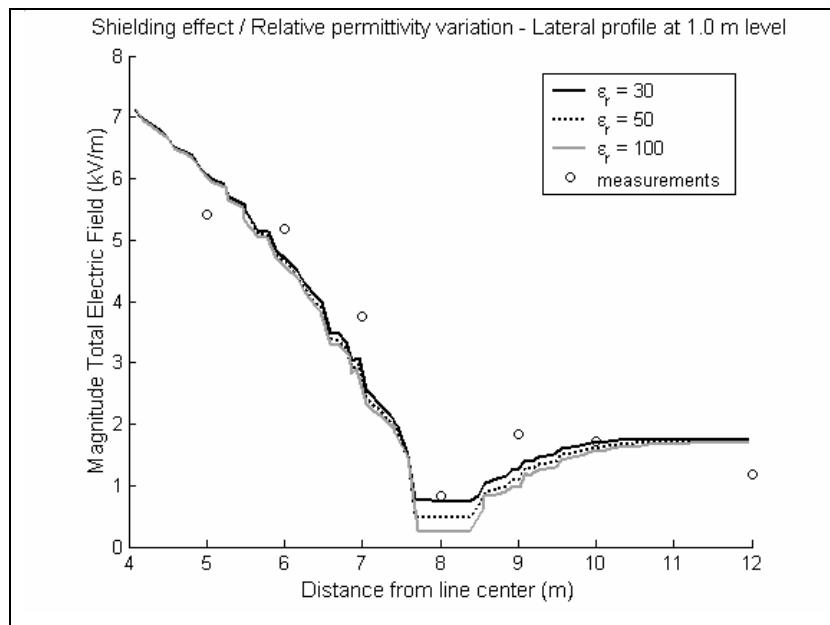


FIGURA 4.9: Comparação dos valores de campo medidos e calculados ao longo do perfil 1,0 m

O resultado do perfil a 1,4 m considerando a representação do corpo por três valores de permissividade relativa está apresentado na FIGURA 4.10

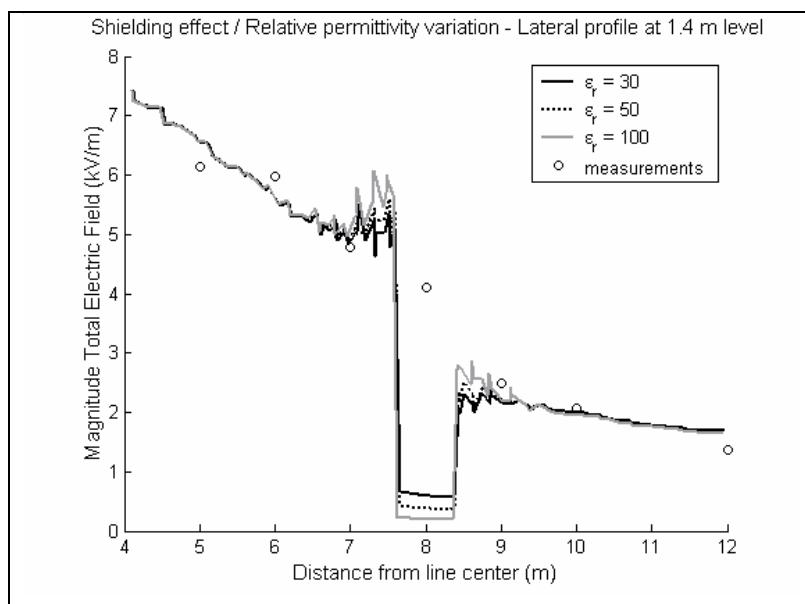


FIGURA 4.10: Comparação dos valores de campo medidos e calculados ao longo do perfil 1,4 m

4.4.2.2 Conclusões

A pesquisa mostrou que o valor de permissividade relativa igual a 30 foi o mais aderente aos valores medidos na situação de exposição de um voluntário sob um campo elétrico gerado por uma linha de transmissão.

A avaliação do ajuste do modelo aos dados experimentais foi feito através da razão entre o campo elétrico externo perturbado pela presença do corpo e o campo elétricas não-perturbado, nas regiões do alto da cabeça, e próximas aos ombros, à cintura e aos tornozelos.

Embora o valor encontrado para a constante de permissividade do corpo humano seja inferior em algumas ordens de grandeza aos adotados em diversos trabalhos da literatura, os resultados obtidos mostraram que o modelo apresenta características de interação semelhantes a de um corpo exposto ao campo elétrico em uma situação real.

Capítulo 5

Proposta de modelos dosimétricos para simulação de exposição a campo magnético

5.1 Introdução

As restrições básicas na faixa de freqüência de 0,1 Hz a 400 Hz conforme visto no Capítulo 2, são estabelecidas para que se previna a ocorrência de magnetofosfenos no tecido retínico sensível (*sensitive retinal tissue*) uma vez que a formação de fosfenos no olho humano foi identificada como o fenômeno de interesse com os menores limiares de campo magnético e de campo elétrico externo para efeitos diretos.

A atenção despertada por esse efeito surge não pelo fenômeno em si, de caráter temporário e praticamente inócuo, a não ser por causar desvio de atenção, mas sim por ser o único efeito identificado em todo o sistema nervoso central, podendo então ser considerado como um indicador. Uma vez que este fenômeno está relacionado a efeitos sinápticos nos tecidos nervosos especializados e, portanto, efeitos similares podem ocorrer em outra parte do sistema nervoso central, particularmente o cérebro, qualquer exposição envolvendo a cabeça deve estar abaixo deste nível.

Dessa forma, torna-se fundamental realizar uma análise criteriosa das intensidades de grandezas físicas como densidades de máximas de corrente e campos elétricos induzidos na região da cabeça utilizando modelos dosimétricos. Deve-se assegurar que os níveis dessas grandezas físicas estejam comprovadamente abaixo dos níveis indicados em Diretrizes e Normas de exposição a campos eletromagnéticos.

Neste Capítulo são apresentados três modelos dosimétricos representativos da região da cabeça, com diferentes graus de detalhamento geométrico, para avaliação da exposição a campo magnético. Foram propostos dois modelos chamados de homogêneos com geometria elíptica e esférica, e um modelo heterogêneo que retrata com maior fidelidade as diferentes regiões da cabeça.

5.2 Implementação dos modelos dosimétricos

A implementação dos modelos dosimétricos foi feita no Programa MEGA, cuja criação do código e seu desenvolvimento até os dias atuais são realizados pelo centro de Pesquisas de Eletromagnetismo Aplicado da Universidade de BATH [44]. O MEGA é um pacote computacional voltado para a solução de problemas de eletromagnetismo em 2D e 3D, envolvendo a solução aproximada de equações diferenciais parciais usando o método dos elementos finitos. Integram este pacote computacional dois programas o MEGAVIEW e o MEGASOLVE. O MEGAVIEW é um pré-processador e pós-processador, que provê ao usuário um ambiente interativo para que este defina, analise e edite modelos eletromagnéticos. O MEGASOLVE é o solver, que resolve o problema de forma não interativa.

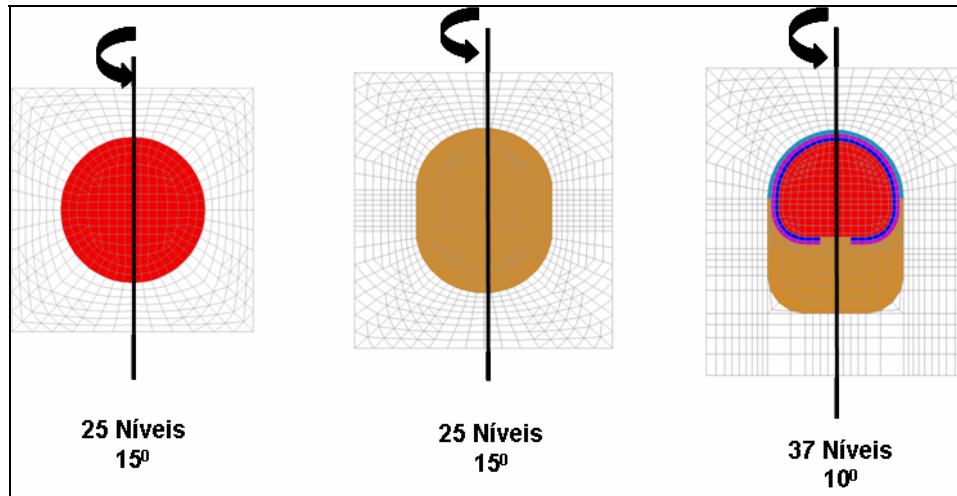
Foram propostos três modelos geométricos tridimensionais, divididos em duas categorias, homogêneos e heterogêneos, representando diferentes estágios de detalhamento de regiões da cabeça.

- Modelos Homogêneos
 - Esférico
 - Elíptico
- Modelo Heterogêneo
 - Modelo da cabeça

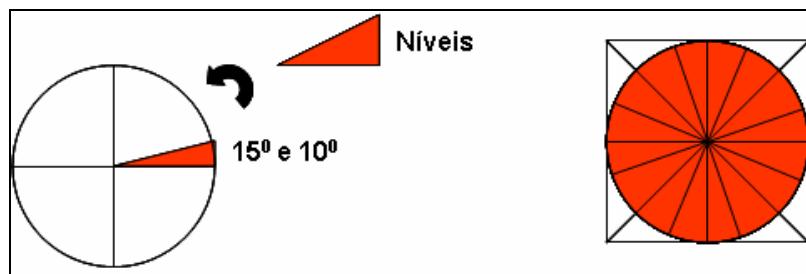
A utilização de um modelo dosimétrico em três dimensões permite a análise da exposição considerando as três componentes do campo magnético (B_x , B_y e B_z), mas em contrapartida exige um elevado esforço computacional, possivelmente tendo que compatibilizar o grau de detalhamento do modelo com os limites do programa. Podem ser considerados como limitantes o número máximo de equações e o número máximo de elementos. O limite atual do programa MEGA é de 100 mil elementos e de 100 mil equações.

A construção do modelo dosimétrico em 3D é feita a partir da construção de uma seção do modelo chamada de plano-base. Esta corresponde à visão bidimensional do objeto no plano r-z de um sistema de coordenadas cilíndricas. A malha principal (plano base em duas dimensões) dos modelos foi construída utilizando essencialmente elementos quadrangulares, com 1 cm de lado, procurando compatibilizá-la com os requisitos de cálculo de densidades de correntes indicadas nas Diretrizes de exposição da ICNIRP, como considerar-se para o cálculo uma área de 1 cm².

Esta malha é então posta a girar em torno de seu eixo de simetria (eixo vertical), conforme apresentado na FIGURA 5.1, para formar a malha em 3D.



O modelo em 3D pode ser visto como segmentos ou gomos de uma laranja, em que os níveis arbitrados, e consequentemente o ângulo de giro, guarda extrema relação com a definição a qual se deseja dar à malha do problema. Sendo o ângulo total de 360°, foram arbitrados passos angulares de 15°, totalizando 25 níveis, para os modelos esférico e elíptico e de 10°, totalizando 37 níveis, para o modelo heterogêneo. A FIGURA 5.2 apresenta os detalhes da geração do modelo a partir de uma vista superior.



- Modelos Homogêneos

A opção por geometrias elíptica e esférica para os modelos homogêneos permite que estes modelos também sejam utilizados para representar diferentes regiões do corpo, como a cabeça, o tronco, uma seção da região abdominal, necessitando para isso apenas de alterações no fator de escala conforme sugerido na FIGURA 5.3.

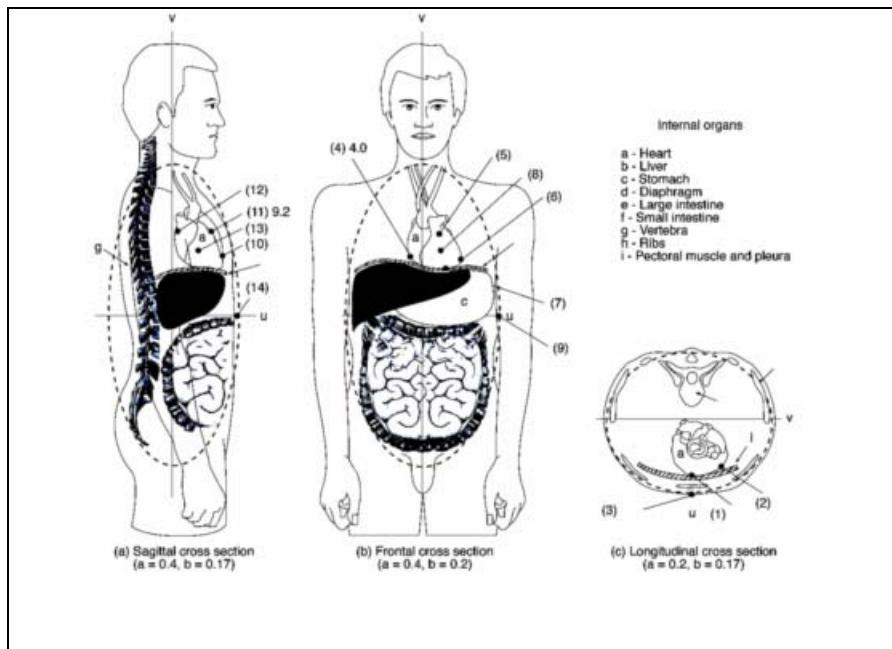


FIGURA 5.3: Proposta de aproximação de algumas regiões de corpo por geometria elíptica [23]

Na FIGURA 5.4 são apresentados os planos base dos modelos homogêneos propostos de geometria esférica e elíptica.

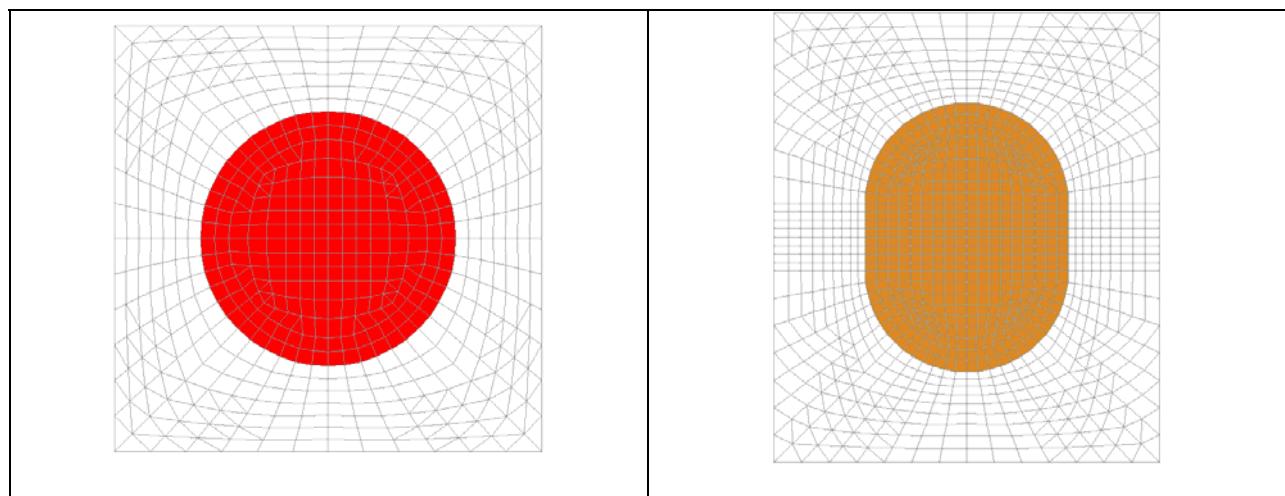


FIGURA 5.4: Plano base dos modelos homogêneos de geometria esférica e elíptica

- **Modelo Heterogêneo**

Na proposta do modelo heterogêneo tentou-se reproduzir diversas regiões da cabeça em detalhes, baseando-se no trabalho de [45], cuja aproximação geométrica é apresentada na FIGURA 5.5.

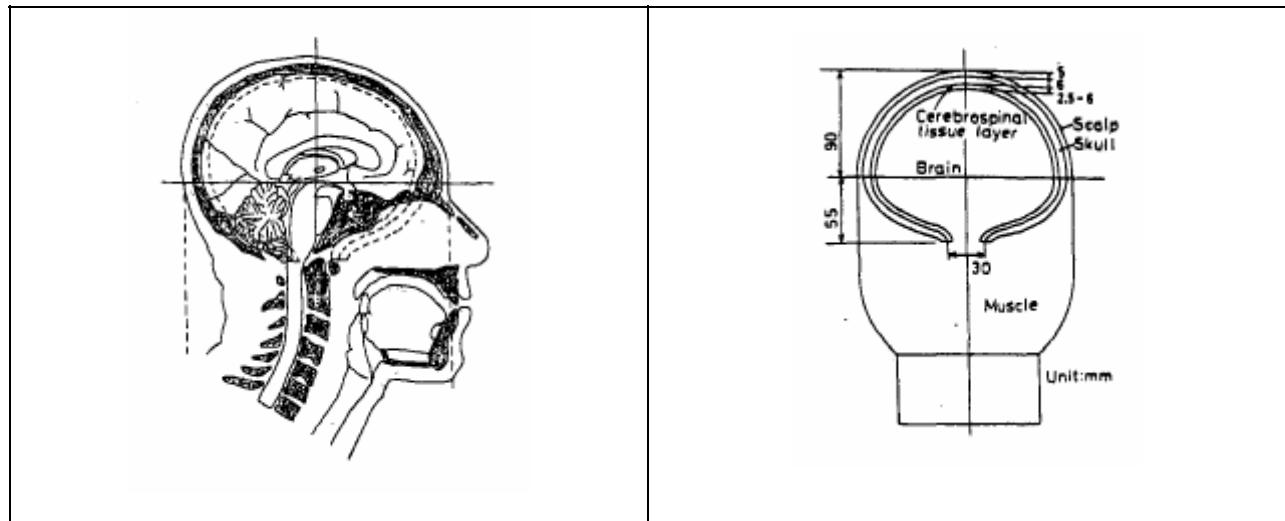


FIGURA 5.5: Representação da região da cabeça [45]

O modelo permite representar quatro regiões específicas da cabeça: o crânio, o cérebro, o couro cabeludo e o líquido cérebro espinhal. O restante da cabeça considera-se como sendo composto por tecidos musculares.

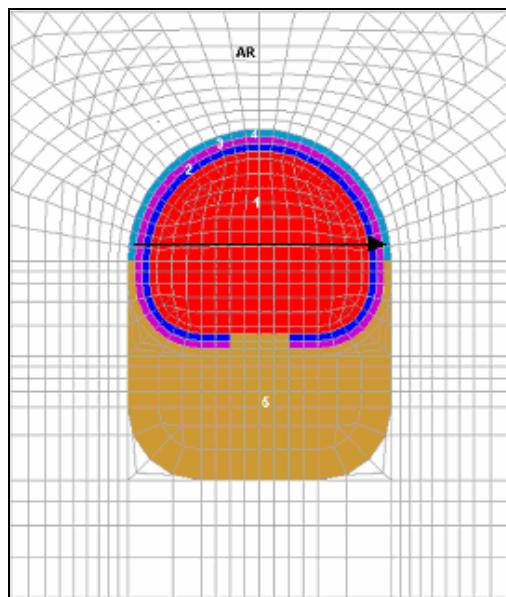


FIGURA 5.6: Regiões representadas no modelo heterogêneo

Na TABELA 5.1 estão listadas as diferentes regiões representadas no modelo heterogêneo, assim como os valores de condutividade de tecidos adotados na referência.

TABELA 5.1: Valores de condutividade das regiões representadas no modelo heterogêneo

Região	Condutividade (S/m)
Cérebro (1)	0,06
Crânio (2)	0,01
Líquido cérebro espinhal (3)	2,0
Couro cabeludo (4)	0,1
Músculo (5)	0,2
Ar (6)	zero

Percebe-se uma grande variação nos valores de condutividade das diferentes regiões representadas. O possível impacto desse contraste entre as sub-regiões foi objeto de investigação em uma das etapas propostas.

É possível representar também regiões com diferentes valores de condutividade nos modelos homogêneos, entretanto não se terá a mesma fidelidade geométrica do modelo heterogêneo.

5.2.1 Formulação do problema

As equações de campo resolvidas pelo MEGA são definidas basicamente pelas equações de Maxwell. Em baixas freqüências as correntes de deslocamento podem ser desprezadas e com isso um subconjunto das equações de Maxwell pode ser usado:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (5.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (5.2)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{H}) \quad (5.3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (5.4)$$

Na prática, as grandezas de campo **E**, **B** e **J** são frequentemente representadas através de potenciais.

Encontram-se disponíveis no programa para problemas tridimensionais os tipos de representação **AV** e **A**. A representação **AV** é um método clássico para representar campos eletromagnéticos usando o potencial vetor magnético (**A**) e o potencial escalar elétrico (**V**). É útil em problemas em que existe contato entre várias regiões, com grande variação nos valores de condutividade, que é exatamente a característica do corpo humano. Quando **A** e **V** são utilizados, o campo elétrico tem duas contribuições,

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (5.5)$$

O termo $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ é normalmente associado com a força eletromotriz induzida ao redor de um laço fechado devido a variação do campo.

Deve-se notar que o conhecimento de **B** e **E** não define de forma única **A** e **V**. São necessárias condições adicionais para impor um calibre (*gauge*) em **A**. Constatou-se que este problema no calibre faz com que o uso do vetor potencial elétrico não seja atrativo. Por não existir fonte externa de campo elétrico no problema a escolha da formulação recaiu para a representação **A**.

Se a região de corrente parasita tem condutividade constante então o campo pode ser representado usando apenas o potencial vetor magnético (**A**). Neste caso pode-se assumir que **V** = 0 e usar somente o **A**,

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (5.6)$$

onde, o vetor potencial magnético **A** é usado para representar a densidade de fluxo magnético.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5.7)$$

Explicitando-se **J** na Equação (5.5), e aplicando-se o divergente em ambos os lados desta equação:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (5.8)$$

Isto significa que a divergência de **A** também é fixa. Se σ é constante, logo:

$$\nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (5.9)$$

E deve ser claro que \mathbf{A} é somente calibrado (*gauged*) se a condutividade é diferente de zero. Entretanto, quando os valores de condutividade são muito baixos podem ocorrer problemas de convergência, como a matriz tender para um sistema singular.

Este problema de convergência pode ser contornado introduzindo-se uma penalidade na divergência de \mathbf{A} :

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} + \left\{ \frac{1}{\mu_0} \nabla \nabla \cdot \mathbf{A} \right\} + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (5.10)$$

Para o calibre total (*fully gauged*) de \mathbf{A} , a componente normal de \mathbf{A} deve ser zero na superfície do condutor.

$$\mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{n}} = 0 \quad (5.11)$$

Para as regiões não-condutoras do problema empregou-se a formulação por potencial escalar magnético, em que a intensidade de campo magnético é obtida através do gradiente do campo escalar.

$$\mathbf{H} = \nabla \psi \quad (5.11)$$

O rotacional de \mathbf{H} é automaticamente zero. No entanto é preciso garantir que a divergência de \mathbf{B} também seja zero:

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \psi) = 0 \quad (5.12)$$

Então, de forma resumida as formulações utilizadas nas simulações foram:

- Potencial escalar magnético (ψ) para as regiões não-condutoras ($\sigma = 0$);
- Potencial vetor magnético (\mathbf{A}) para as regiões de correntes parasitas ($\sigma \neq 0$).

5.3 Etapas de simulação

Para a avaliação de exposição ao campo magnético foram estabelecidas duas etapas de simulação, cujos objetivos são descritos na seqüência:

1. Observar a influência da geometria através do comparativo entre os modelos dosimétricos propostos, analisando-se o módulo da corrente induzida em perfis horizontais e verticais;

Os resultados numéricos dos modelos dosimétricos foram posteriormente comparados aos obtidos com os modelos analíticos utilizados por IEEE e ICNIRP.

2. Analisar a influência do contraste entre os valores de condutividade das sub-regiões do modelo heterogêneo, considerando os dados de condutividades obtidos através de duas referências, e investigar a possível não linearidade da relação entre as densidades de correntes induzidas com a freqüência decorrente do contraste entre os valores de condutividade das sub-regiões do modelo.

Os resultados das simulações foram expressos através do valor eficaz do módulo das densidades de correntes induzidas, sendo obtidos através de perfis horizontais e verticais de cálculo. Os perfis horizontais de cálculo estão reunidos na TABELA 5.3.

TABELA 5.3: Perfis horizontais de cálculo

Modelos	Perfis de cálculo para valores constantes de 'Y' (metros)		
	(1)	(2)	(3)
Esférico	0,004	0,015	0,035
Elíptico	0,004	0,05	0,09
Heterogêneo	0,018	0,043	0,095

Os três perfis foram estabelecidos com a condição de que passassem pelo centro dos elementos da malha de cada modelo conforme mostrado na FIGURA 5.7.

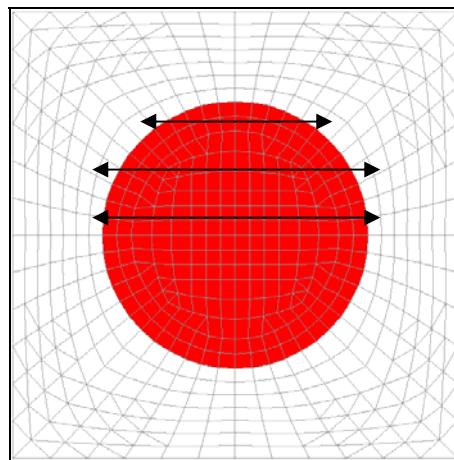


FIGURA 5.7: Perfis horizontais de cálculo

Os perfis verticais de cálculo estão reunidos na TABELA 5.4.

TABELA 5.4: Perfis verticais de cálculo

Modelos	Perfis de cálculo para valores constantes de 'X' (metros)		
	(1)	(2)	(3)
Esférico	0,025	0,05	0,065
Elíptico	0,015	0,05	0,075
Heterogêneo	0,013	0,045	0,076

Os três perfis de cálculo foram estabelecidos de tal forma que passassem pelo centro dos elementos da malha de cada modelo conforme mostrado na FIGURA 5.9.

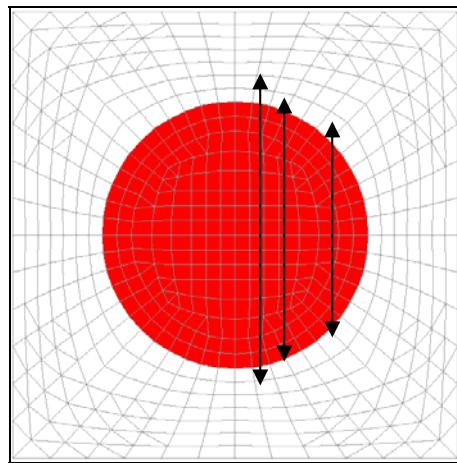


FIGURA 5.9: Perfis verticais de cálculo

5.4 Comparação entre os modelos propostos e validação

Foram propostos três modelos geométricos, divididos em duas categorias, homogêneos e heterogêneos, representando diferentes estágios de detalhamento de regiões da cabeça.

Na TABELA 5.2 estão reunidas as principais dimensões dos modelos propostos.

TABELA 5.2: Dimensões principais dos modelos

Modelos	Dimensões (m)	
	Largura	Altura
Esférico	0,18	0,18
Elíptico	0,18	0,24
Heterogêneo	0,18	0,24

Os modelos foram construídos para que tivessem a mesma largura, com um raio equivalente de 0,09 m, mas que diferissem em suas alturas e suas geometrias, especialmente pelo seu contorno externo (periferia). Tais características modificam a área efetiva de exposição e consequentemente o módulo das correntes induzidas.

Os modelos foram posicionados no eixo de coordenadas cartesiano de tal forma que sua maior dimensão, chamada de altura, estaria ao longo do eixo Y (vertical). A orientação dos modelos é mostrada na FIGURA 5.7.

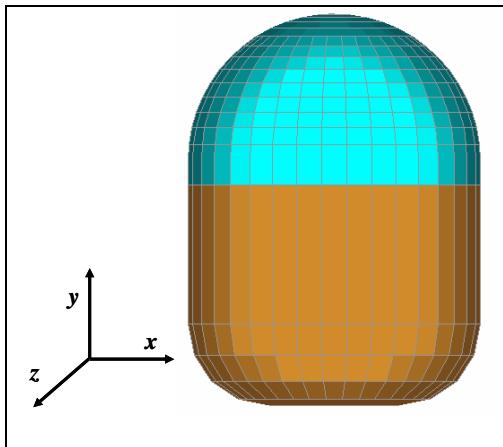


FIGURA 5.7: Orientação dos modelos segundo eixo de coordenadas cartesiano

A fim de quantificar as diferenças no módulo das correntes induzidas nos modelos considerando-se apenas as suas diferenças geométricas, foram estabelecidos os seguintes parâmetros para a simulação de exposição a um campo magnético uniforme:

- Exposição frontal a campo magnético (densidade de fluxo magnético uniforme) de 1 μT e ângulo de fase de 0 °; orientação do campo magnético na direção do eixo z. Chama-se por direção frontal de exposição à orientação do campo magnético segundo o eixo Z, que resulta no acoplamento máximo entre o campo e o modelo;
- Como o principal interesse desta etapa estava na comparação da distribuição de correntes induzidas nos modelos, não apenas na observação dos valores máximos, adotou-se nos modelos o valor condutividade elétrica de 0,2 S/m. Este é considerado um valor médio para o corpo humano e também utilizado por ICNIRP e IEEE, o que compatibiliza os resultados da simulação a uma posterior comparação com os resultados obtidos com modelos analíticos.

5.4.1 Resultados

Inicialmente são apresentados os resultados da simulação em termos da distribuição da densidade de corrente induzida obtida para os três modelos dosimétricos.

Os perfis de cálculo, horizontais e verticais, foram traçados no plano XY ($Z = 0$) para um campo magnético de 1 μT orientado na direção de Z ($B_Z = 1 \mu\text{T}$).

▪ **Modelo Esférico**

Na FIGURA 5.10 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'X' para três valores constantes de 'Y', que são os três perfis horizontais de cálculo.

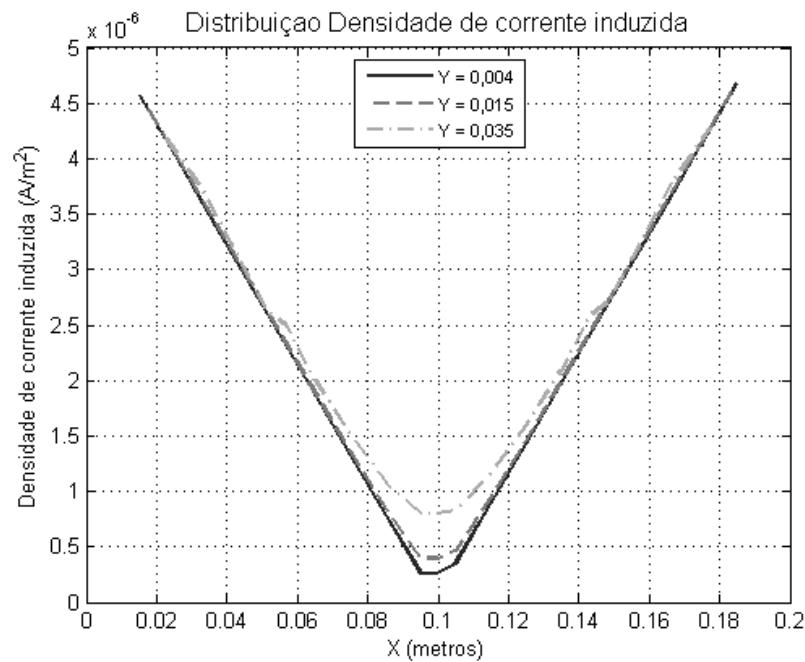


FIGURA 5.10: Perfil horizontal de cálculo

Na FIGURA 5.11 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'Y' para três valores constantes de 'X', que são os três perfis horizontais de cálculo.

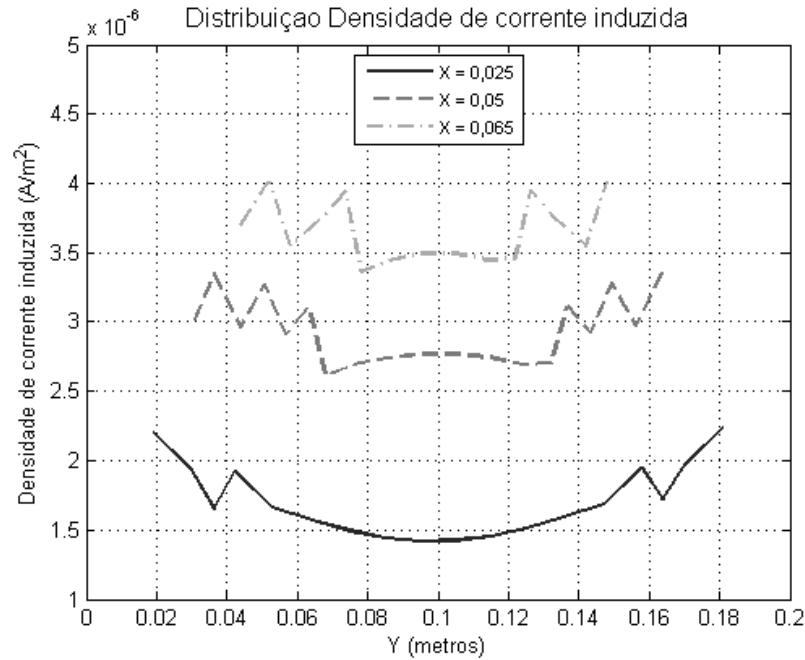


FIGURA 5.11: Perfil vertical de cálculo

- **Modelo Elíptico**

Na FIGURA 5.12 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'X' para três valores constantes de 'Y', que são os três perfis horizontais de cálculo.

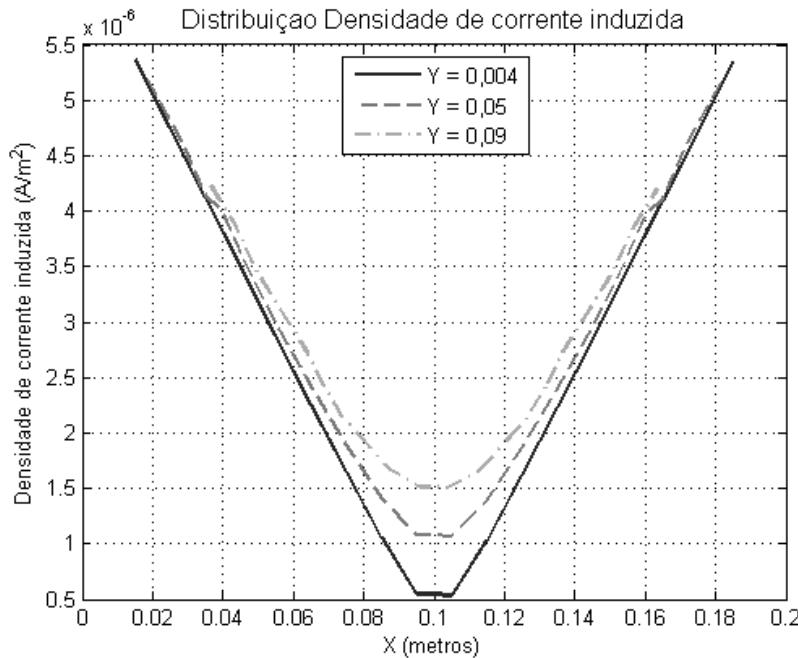


FIGURA 5.12: Perfil horizontal

Na FIGURA 5.13 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'Y' para três valores constantes de 'X', que são os três perfis verticais de cálculo.

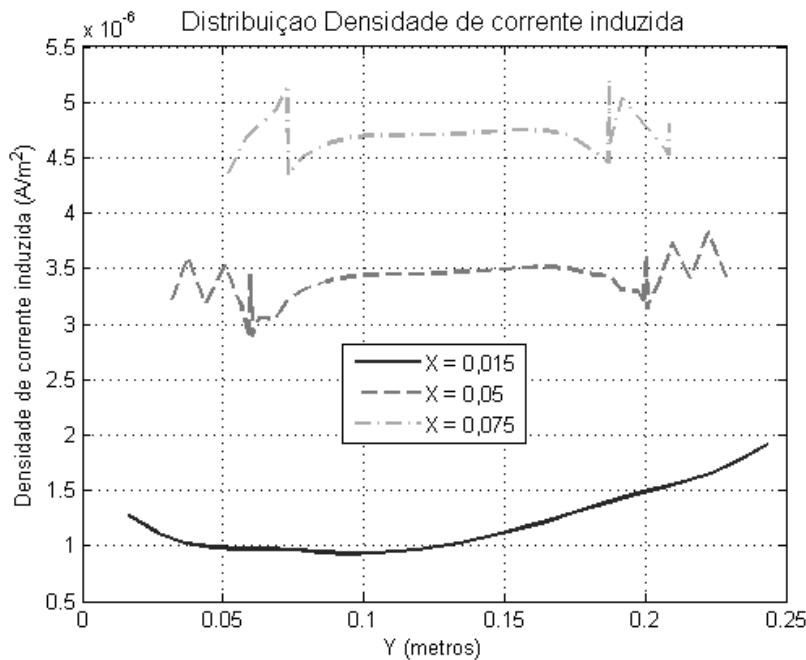


FIGURA 5.13: Perfil vertical

- **Modelo Heterogêneo**

Na FIGURA 5.14 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'X' para três valores constantes de 'Y', que são os três perfis horizontais de cálculo.

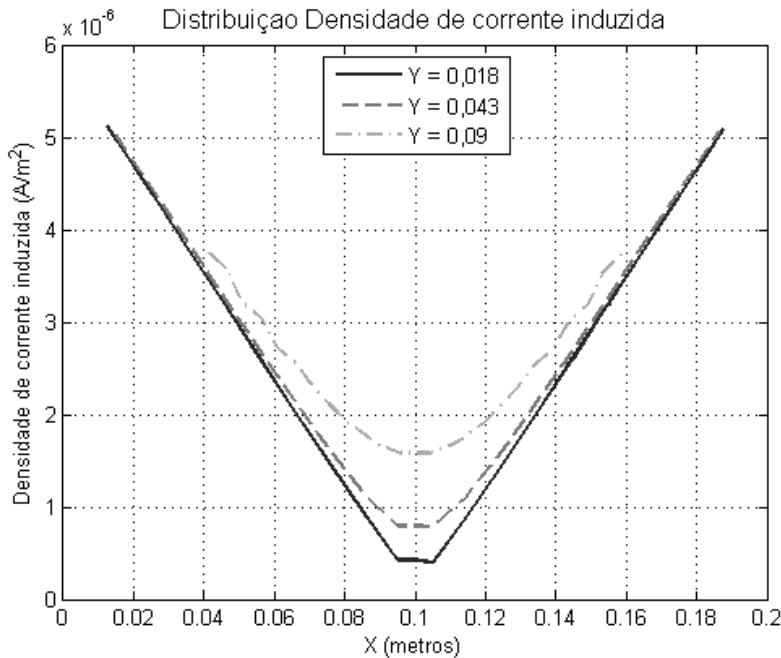


FIGURA 5.14: Perfil horizontal

Na FIGURA 5.15 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'Y' para três valores constantes de 'X', que são os três perfis verticais de cálculo.

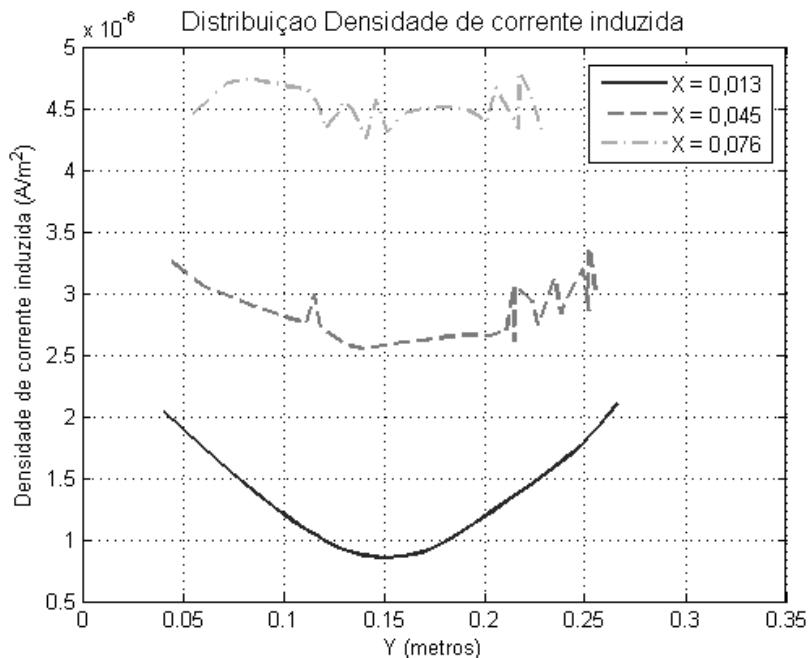


FIGURA 5.15: Perfil vertical

5.4.2 Discussão

O objetivo desta etapa de simulação foi o de observar a influência da geometria dos modelos na distribuição da densidade de correntes induzidas.

Por simplicidade optou-se apenas por discutir a exposição frontal a campo magnético, com densidade de fluxo magnético de 1 μT e ângulo de fase de 0 °. Esta orientação resulta no acoplamento máximo entre o campo magnético externo e os modelos (maior interceptação de fluxo), e impõe que as correntes induzidas nos modelos (correntes parasitas) circulem em torno do eixo Z, tornando a parcela ao longo da direção do eixo Z desprezável.

Os três modelos propostos foram construídos com a mesma largura, equivalente a um raio de 0,09 m, porém com diferenças geométricas significativas em seu contorno externo. Essa característica torna as áreas dos modelos que estão efetivamente expostas ao campo magnético externo, diferentes, o que é condição suficiente que as distribuições de densidade de correntes induzidas nos modelos também sejam diferentes conforme pode ser verificado nos resultados dos perfis horizontais e verticais de cálculo mostrados na seção anterior.

Os resultados dos perfis horizontais mostram que os valores eficazes das correntes induzidas nos modelos aumentam consideravelmente ao longo da direção do eixo X, observando-se uma relação de 10:1 entre o valor de densidade de corrente na extremidade do modelo elíptico com o registrado próximo ao centro, no perfil 1 de cálculo. Isto de certa forma mostra a dependência das correntes parasitas que circulam na seção transversal dos modelos (plano XY) com a largura do caminho, devendo-se esperar, inclusive, que os valores no centro dos modelos fossem nulos, entretanto, isto não se confirmou nas simulações.

Na Tabela 5.3 é mostrada essa variação dos valores das correntes induzidas através da relação entre os valores máximos e mínimos dessa grandeza em cada um dos perfis de cálculo.

TABELA 5.3: Relação entre o módulo da densidade de corrente induzida ($\mu\text{A/m}^2$) nas posições próximas à extremidade e ao centro dos modelos

Modelos	Relação entre o módulo da densidade de corrente induzida próxima ao centro e à periferia do modelo					
	Perfil horizontal			Perfil vertical		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Esférico	18,1	11,5	5,3	1,55	1,14	1,1
Elíptico	10,1	6,3	4,9	2,1	1,2	1,1
Heterogêneo	12,8	6,4	2,4	2,5	1,2	1,0

Comparando-se as relações entre os valores máximos e mínimos de densidade de corrente nos perfis de cálculo em cada modelo, fica evidente a influência da semelhança geométrica entre os modelos esférico e heterogêneo na distribuição de densidade de corrente induzida. Nota-se também uma variação excessiva dos valores de densidade de corrente no modelo esférico (18:1) o que pode indicar a necessidade de maior refinamento da malha.

Este questionamento de certo modo se confirma observando os perfis de cálculo dos modelos, que mostraram uma maior oscilação de valores na simulação com o modelo esférico. Logo, se conclui que tal instabilidade numérica se deve ao menor refino utilizado para a formação da malha do modelo esférico em comparação ao modelo elíptico e o heterogêneo.

A fim de ilustrar a questão do refinamento da malha, são mostrados na seqüência o número total de nós e elementos que formam a malha dos modelos.

- Modelo esférico: Formado por 8304 elementos e 7900 nós;
- Modelo elíptico: Formado por 15264 elementos e 14775 nós;
- Modelo heterogêneo: Formado por 21096 elementos e 21349 nós.

Os detalhes da construção da malha dos planos-base (seção bidimensional) dos modelos podem ser vistos na FIGURA 5.16.

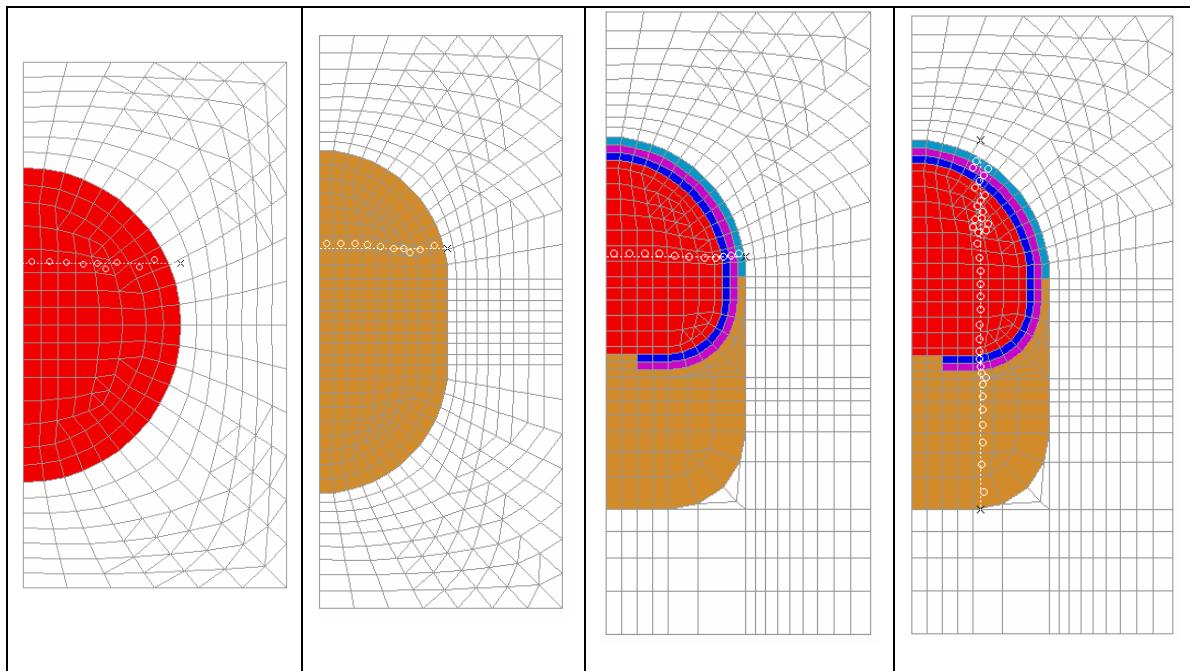


FIGURA 5.16: Justificativa para a instabilidade numérica nos modelos

Esta instabilidade numérica especialmente na região próxima às extremidades dos modelos também se deve à maneira com que o programa MEGA seleciona e ativa os elementos. A informação dos valores calculados no perfil, no caso o valor eficaz do módulo da densidade de corrente, são obtidos do centro dos elementos considerados mais próximos, que

para serem ativados, precisam que o perfil passe por dois de seus lados. Esta situação é exemplificada na FIGURA 5.16, através de perfis horizontais traçado nos modelos homogêneos, e dos perfis vertical e horizontal traçados no modelo heterogêneo.

Os modelos homogêneos devido as suas simetrias geométricas, tanto vertical quanto horizontal, deveriam apresentar curvas de densidade de corrente induzidas também simétricas aos dois eixos. Enquanto que o modelo heterogêneo por possuir apenas simetria geométrica vertical, esperaria-se que apresentasse curvas simétricas em relação ao eixo vertical.

A fim de investigar essa característica dos modelos, foram analisados os seis perfis de cálculo, tomando-se para a análise os pontos extremos de cada perfil. Os resultados estão reunidos na TABELA 5.4 e na TABELA 5.5.

TABELA 5.4: Erro relativo entre os valores de densidade de corrente nas extremidades dos modelos homogêneos

Modelos	Erro relativo (%)					
	Perfil horizontal			Perfil vertical		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Esférico	2,07	2,02	2,01	1,47	0,48	0,14
Elíptico	0,47	0,53	0,67	33,47	7,8	3,29

TABELA 5.5: Erro relativo entre os valores de densidade de corrente nas extremidades do modelo heterogêneo

Modelo	Erro relativo (%)					
	Perfil horizontal			Perfil vertical		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Heterogêneo	0,86	0,73	0,54	2,84	9,13	2,69

Com exceção dos perfis verticais 1 e 2 do modelo elíptico que apresentaram erros relativos elevados, 33 e 8%, respectivamente, os demais perfis mostraram resultados satisfatórios, apresentando erros relativos inferiores a 3%.

Se faz necessária, entretanto, investigação adicional para se identificar a razão do desvio de 33 % apresentado pelo perfil vertical 1 do modelo elíptico.

Embora não possua simetria vertical, o modelo heterogêneo apresentou erros relativos inferiores a 3 %, em dois perfis verticais e de 9 % no perfil 2. Esse resultados são interessantes pois representam essencialmente o efeito da diferenças geométricas entre os modelos elíptico

e heterogêneo. O ajuste do modelo heterogêneo à geometria elíptica é mostrado na FIGURA 5.16.

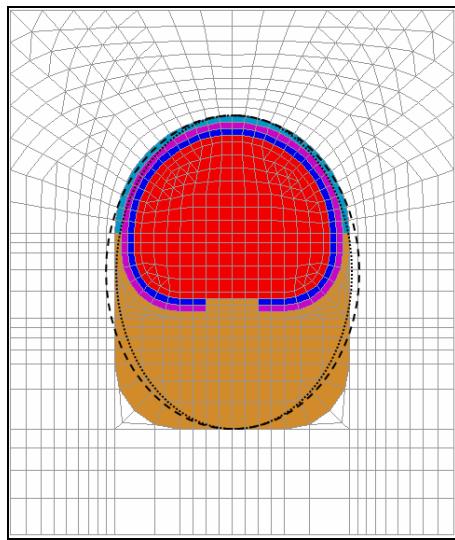


FIGURA 5.16: Ajuste do modelo heterogêneo à geometria elíptica

Finalmente, foram comparados os valores de densidades de corrente induzidas na região próxima às extremidades dos três modelos dosimétricos. A escolha recaiu sobre o perfil 1 por apresentar o maior módulo de densidade de corrente induzida entre os perfis de cálculo. Os valores de densidade de corrente induzida em pontos próximos à fronteira dos modelos estão reunidos na TABELA 5.6.

TABELA 5.6: Comparação entre os valores de densidade de corrente induzida nos modelos

Modelos	Módulo da máxima densidade de corrente induzida ($\mu\text{A/m}^2$)	
	Perfil horizontal (1)	Perfil vertical (1)
Esférico	4,12	1,72
Elíptico	4,72	1,65
Heterogêneo	4,35	1,91

Esperava-se que para o perfil 1 horizontal os modelos convergissesem para o mesmo valor de densidade de corrente, uma vez que nessa região apresentam contornos bastante parecidos. No entanto, tem-se pouca confiança nos resultados dos perfis horizontais dos modelos esférico e elíptico, pois como foi mostrado anteriormente o modelo elíptico apresentou grande desvio nesse perfil de cálculo e o modelo esférico pelo pouco refinamento na malha tem sobreestimado os resultados na fronteira. Pelo fato do modelo heterogêneo ter

apresentado os resultados mais confiáveis, adotou-se esse valor também para o modelo elíptico.

Os resultados dos perfis verticais mostraram-se bastante satisfatórios, retratando o efeito das diferenças geométricas entre os modelos, com o modelo heterogêneo apresentado o maior valor de densidade de corrente, $1,91 \mu\text{A/m}^2$, seguido do modelo esférico, com o valor sobreestimado de $1,72 \mu\text{A/m}^2$, superando o valor do modelo elíptico, $1,65 \mu\text{A/m}^2$ que se esperaria ser superior.

Os valores de densidade de correntes induzidas reunidos na TABELA 5.6 foram utilizados para a comparação com os resultados obtidos com os modelos analíticos do ICNIRP e IEEE.

A comparação dos valores obtidos com os modelos numéricos com os obtidos através de modelos analíticos continua sendo utilizada para a validação dos modelos numéricos.

Para o cálculo das densidades de correntes induzidas e do campo elétrico induzido, foram utilizadas, a Equação 5.1 e a Equação 5.2, que representam respectivamente as formulações utilizadas por ICNIRP e IEEE. Considerou-se a exposição a um campo magnético de $1 \mu\text{T}$ (densidade de campo magnético), orientado em uma direção normal ao plano do modelo, e adotou-se o valor de condutividade elétrica de $0,2 \text{ S/m}$. Os termos que compõe as equações, as variáveis e constantes, estão descritas no Capítulo 2.

$$E = -\frac{dB}{dt} \times \frac{1}{2} r \quad (5.1)$$

$$E = -\frac{dB_w}{dt} \left| \frac{a^2 ua_v - b^2 va_u}{a^2 + b^2} \right| \quad (5.2)$$

Em seguida, os valores de campo elétrico induzido, obtidos através do Modelo do IEEE, foram convertidos para valores de densidade de corrente induzida, através da Lei de Ohm.

$$J = \sigma E \quad (5.3)$$

Para os cálculos utilizando a formulação do ICNIRP foi utilizado o raio adotado no modelo esférico, enquanto nos cálculos com o modelo IEEE utilizou-se as dimensões adotadas no modelo elíptico (essencialmente o mesmo raio de $0,09 \text{ m}$).

Deve-se ressaltar que o modelo elíptico trata-se de uma aproximação à geometria elíptica conforme pode ser verificado na FIGURA 5.17. Sua geometria permite que sejam ajustadas duas elipses, inscritas ou circunscritas, por isso foram necessárias algumas adaptações para realizar a comparação com o modelo IEEE.

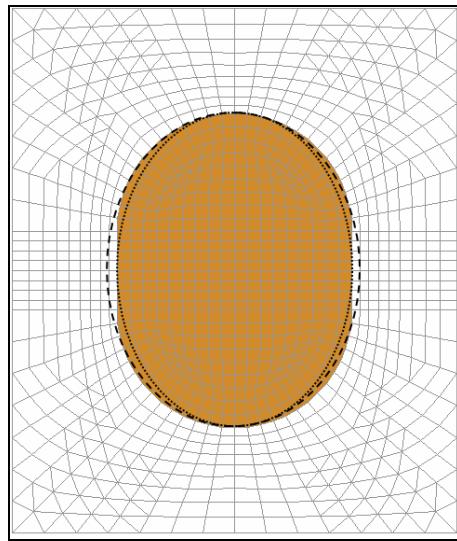


FIGURA 5.17: Ajuste do modelo à geometria elíptica

Na seqüência são apresentados os resultados obtidos com o modelo analítico do IEEE em termos da distribuição da densidade de corrente induzida. Foram utilizados os mesmos perfis de cálculo, tanto horizontal quanto vertical, da simulação realizada com o modelo elíptico.

Na FIGURA 5.18 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'X' para três valores constantes de 'Y', que são os três perfis horizontais de cálculo. Para traçar-se a curva relativa ao modelo do ICNIRP, considerou-se a direção ao longo do eixo X.

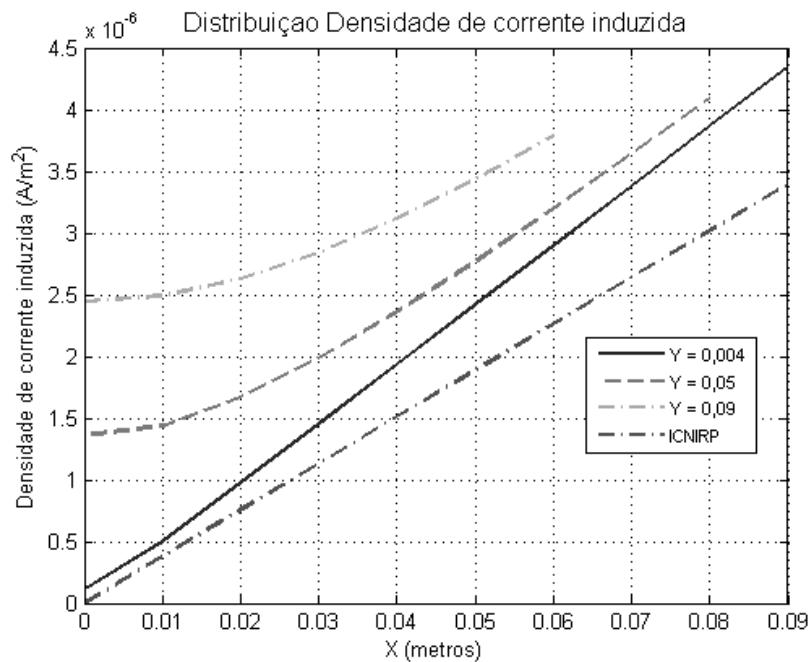


FIGURA 5.18: Perfis horizontais

Na FIGURA 5.19 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'Y' para três valores constantes de 'X', que são os três perfis verticais de cálculo.

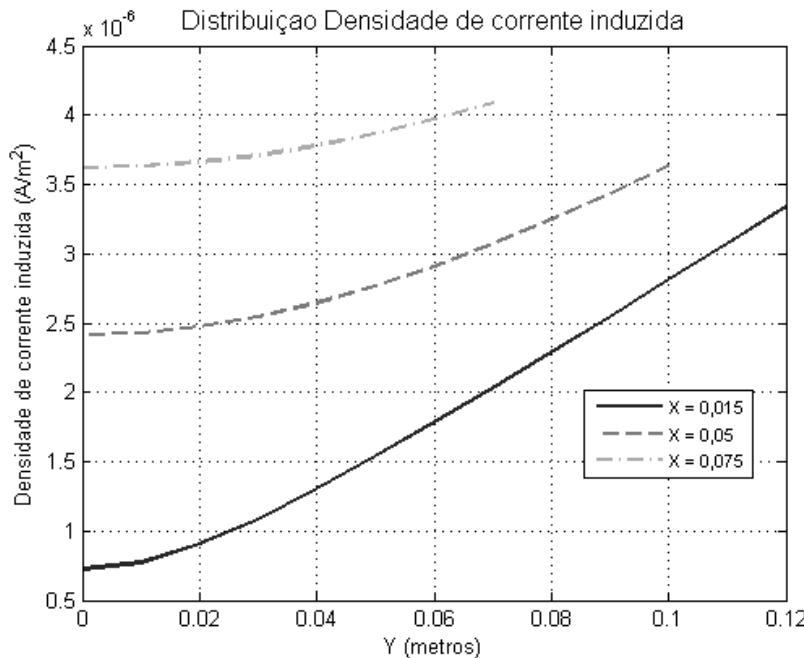


FIGURA 5.19: Perfis verticais

Na TABELA 5.7 estão reunidos os valores de densidade de corrente induzida na periferia dos modelos analíticos propostos por IEEE e ICNIRP.

TABELA 5.7: Resultados obtidos com os modelos analíticos

Modelos	Módulo da máxima densidade de corrente induzida ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	
	Perfil horizontal (1)	Perfil vertical (1)
IEEE	4,11 ($x = 0,0875$)	1,54
ICNIRP	3,29 ($r = 0,0874$)	-

Finalmente é feita a comparação entre os resultados obtidos com os modelos numéricos, apresentados na TABELA 5.6, com os obtidos com os métodos analíticos, apresentados na TABELA 5.7. Os valores dos métodos analíticos foram utilizados como referência.

Para o perfil 1 horizontal o modelo elíptico apresentou um erro relativo de 5,84%, enquanto o modelo esférico apresentou um erro relativo de 25,23 %.

Para o perfil vertical o modelo elíptico apresentou um erro relativo de 7,14 %.

5.5 Simulações utilizando modelo heterogêneo

A representação da região da cabeça por um modelo homogêneo não retrata a sua complicada estrutura interna, composta por órgãos com dimensões variadas e formas geometricamente complexas, todos exibindo diferentes propriedades elétricas. Por isso ao se adotar um único valor de condutividade no modelo de avaliação de exposição a campo magnético, pode-se estar ocorrendo em grandes erros, subestimando, por exemplo, os valores de densidades de correntes induzidas em regiões próximas ao cérebro.

O modelo heterogêneo, apresentado na FIGURA 5.6, representa com maior fidelidade a anatomia da região da cabeça que os modelos homogêneos. Possibilitando a representação de quatro regiões específicas da cabeça: o crânio, o cérebro, o couro cabeludo e o líquido cérebro espinhal. O restante da cabeça considera-se como sendo composto por tecidos musculares. O maior detalhamento permite que se avalie o módulo das densidades de correntes em regiões específicas na cabeça.

Deve-se, entretanto, reconhecer algumas das limitações desse modelo. São elas: representar o cérebro como um único tecido homogêneo, desconsiderando os dois tipos de tecidos que o compõe (branco e cinza); a omissão de tecidos cartilaginosos e camadas de gordura e; a ausência de circulação de sangue em artérias e veias.

5.5.1 Contraste nos valores de condutividade das sub-regiões

Para esta etapa de simulações procurou-se analisar a influência do contraste entre os valores de condutividade das sub-regiões do modelo heterogêneo, utilizando para isso os valores de condutividades fornecidos por duas referências.

As simulações foram desenvolvidas considerando duas direções de exposição para o campo magnético:

- Exposição frontal a campo magnético (densidade de fluxo magnético uniforme), ou seja, orientado segundo a direção do eixo Z, de 1 μT e ângulo de fase de 0°;
- Exposição vertical a campo magnético (densidade de fluxo magnético uniforme), ou seja, orientado segundo a direção do eixo Z, de 1 μT e ângulo de fase de 0°.

Os valores de condutividade utilizados encontram-se reunidos na TABELA 5.9.

TABELA 5.9: Valores de condutividade obtidos das duas referências

Região	Condutividade (S/m) [11]	Condutividade (S/m) [45]
Cérebro (1)	0,06	0,065
Líquido cérebro espinhal (2)	2,0	1,0
Crânio (3)	0,01	0,01
Couro cabeludo (4)	0,1	0,1
Músculo (5)	0,2	0,2
Ar (6)	zero	zero

5.5.1.1 Resultados

(a) Exposição frontal a campo magnético e valores de condutividade de [11]

Na seqüência são apresentados os resultados da simulação em termos da distribuição da densidade de corrente induzida no modelo heterogêneo, considerando uma exposição frontal a campo magnético (densidade de fluxo magnético uniforme), orientado segundo a direção do eixo Z, de 1 μ T e ângulo de fase de 0°. Os perfis de cálculo, horizontais e verticais, foram traçados no plano XY ($Z = 0$).

Estes resultados são apresentados em termos da distribuição da densidade de corrente induzida, utilizando-se perfis de cálculo, horizontais e verticais, traçados no plano XY ($Z = 0$).

Na FIGURA 5.20 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'X' para três valores constantes de 'Y', que são os três perfis horizontais de cálculo.

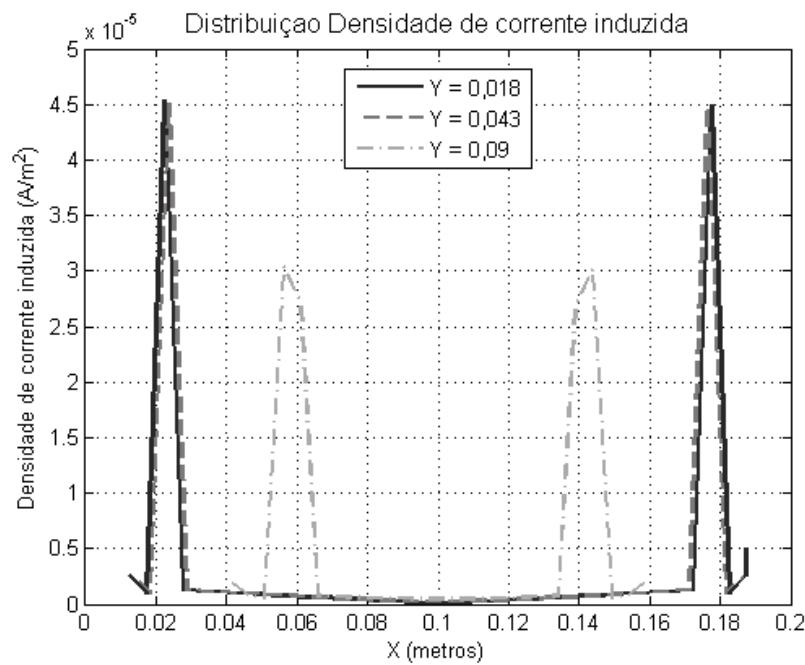


FIGURA 5.20: Perfis horizontais de cálculo

Na FIGURA 5.21 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'Y' para três valores constantes de 'X', que são os três perfis verticais de cálculo.

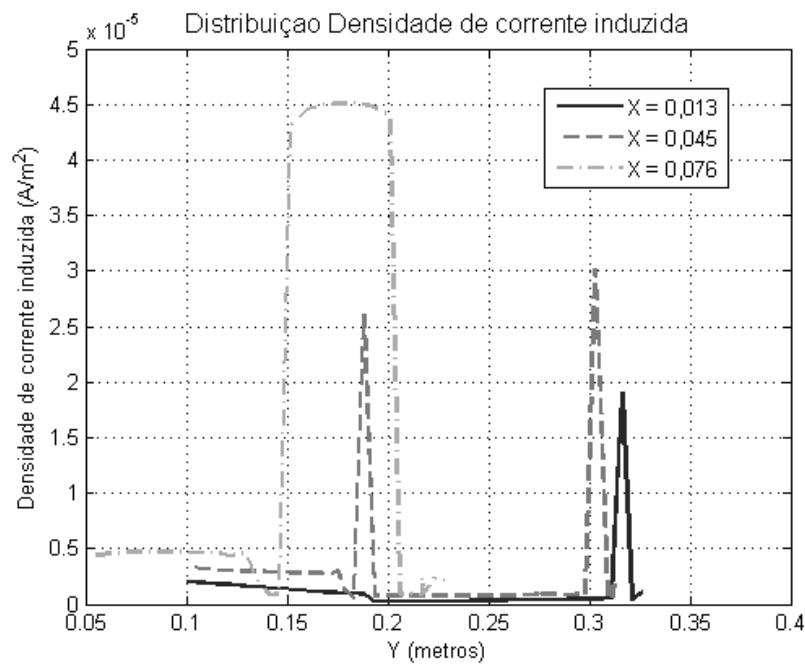


FIGURA 5.21: Perfis verticais de cálculo

Para facilitar a análise dos resultados obtidos na simulação, os maiores valores de densidade de correntes induzidas em cada perfil foram reunidos na TABELA 5.10.

TABELA 5.10: Módulo da densidade de corrente induzida

Modelo	Distribuição de densidade de corrente induzida ($\mu\text{A/m}^2$)					
	Perfil horizontal			Perfil vertical		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Heterogêneo	44,99	44,76	30,17	19,11	30,17	45,11

Os valores máximos de densidades de correntes induzidas nos perfis são exatamente os picos verificados nos gráficos dos perfis.

(b) Exposição frontal a campo magnético e condutividade de [45]

Na seqüência são apresentados os resultados da simulação em termos da distribuição da densidade de corrente induzida no modelo heterogêneo, considerando uma exposição frontal a campo magnético (densidade de fluxo magnético uniforme), orientado segundo a direção do eixo Z, de 1 μT e ângulo de fase de 0°. Os perfis de cálculo, horizontais e verticais, foram traçados no plano XY ($Z = 0$). Estes resultados são apresentados em termos da distribuição da densidade de corrente induzida, utilizando-se perfis de cálculo, horizontais e verticais, traçados no plano XY ($Z = 0$).

Na FIGURA 5.22 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'X' para três valores constantes de 'Y', que são os três perfis horizontais de cálculo.

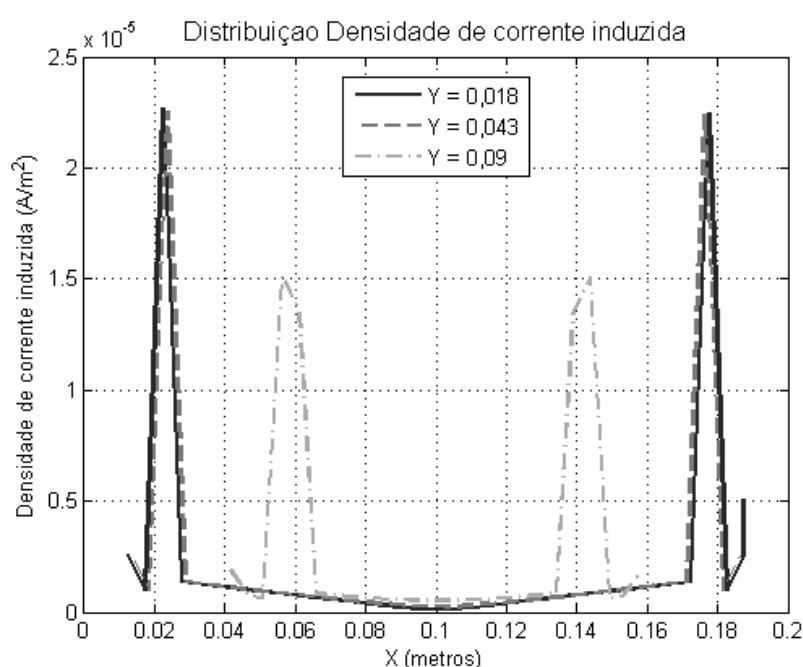


FIGURA 5.22: Perfis horizontais de cálculo

Na FIGURA 5.23 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'Y' para três valores constantes de 'X', que são os três perfis verticais de cálculo.

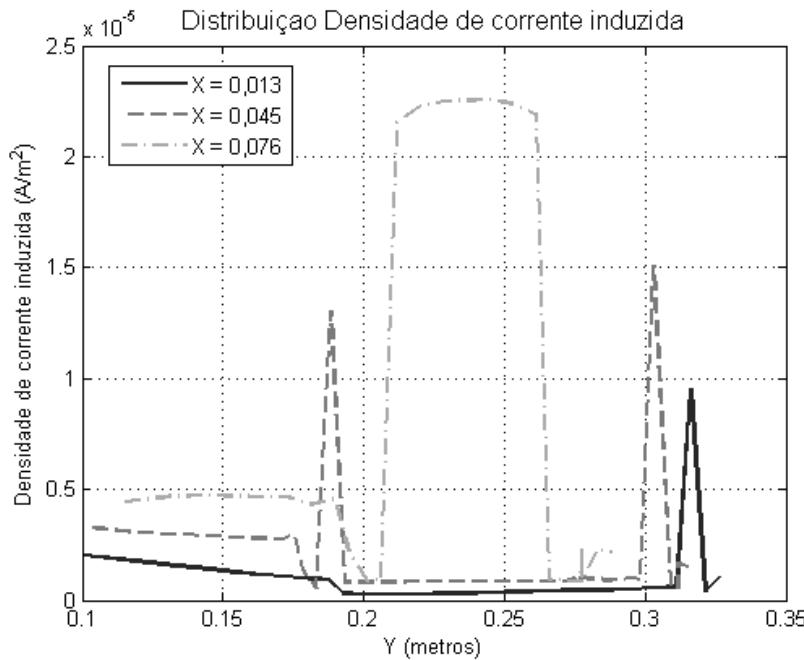


FIGURA 5.23: Perfis verticais de cálculo

Para facilitar a análise dos resultados obtidos na simulação, os maiores valores de densidade de correntes induzidas em cada perfil foram reunidos na TABELA 5.11.

TABELA 5.11: Módulo da densidade de corrente induzida

Modelo	Distribuição de densidade de corrente induzida ($\mu\text{A/m}^2$)					
	Perfil horizontal			Perfil vertical		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Heterogêneo	22,49	22,38	15,08	9,556	15,08	22,55

Os valores máximos de densidades de correntes induzidas nos perfis são exatamente os picos verificados nos gráficos dos perfis.

(c) Exposição vertical a campo magnético

Na seqüência são apresentados os resultados da simulação em termos da distribuição da densidade de corrente induzida no modelo heterogêneo, considerando uma exposição vertical a campo magnético, orientado segundo a direção do eixo Y, com densidade de fluxo magnético de $1 \mu\text{T}$ e ângulo de fase de 0° .

Estes resultados são apresentados em termos da distribuição da densidade de corrente induzida, em função apenas da distância em relação ao eixo Y. O perfil de cálculo foi traçado no plano $Y = 0,018$.

Na FIGURA 5.24 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida obtida no plano ' $Y = 0,018$ ', como função apenas da distância em relação ao eixo Y, chamada de 'Raio' para um modelo homogêneo com condutividade igual a $0,2 \text{ S/m}$.

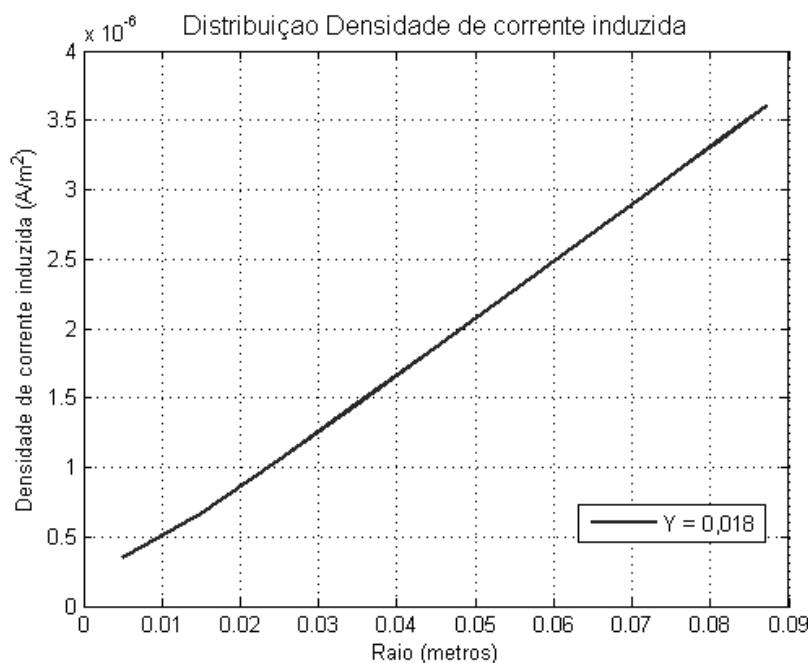


FIGURA 5.24: Perfis verticais de cálculo

Sob essa orientação de exposição o modelo heterogêneo apresenta resultados semelhantes aos que se obteria utilizando um modelo esférico. Isto se justifica pelo fato que a seção transversal do modelo ser exatamente um círculo de raio 0,09.

Posteriormente, foram adotados na simulação do modelo também os valores de condutividade de duas referências [11] e [45].

Na FIGURA 5.25 é apresentada os resultados da simulação, em termos da distribuição da densidade de corrente induzida obtida no plano ' $Y = 0,018$ ', como função apenas da distância em relação ao eixo Y, chamada de 'Raio'.

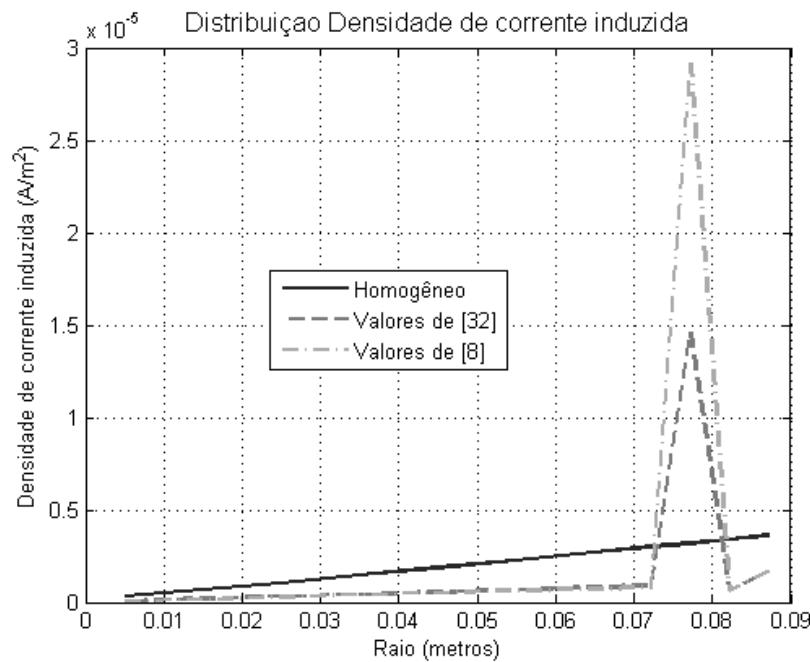


FIGURA 5.25: Perfis verticais de cálculo

Nota-se que as curvas dos modelos em que se utilizaram os valores de condutividade das referências [11] e [45] apresentam comportamento similar entre si, no entanto, inteiramente diferente da curva resultante do modelo homogêneo de condutividade 0,2 S/m.

O comportamento das três curvas demonstra a importância da determinação dos valores de condutividade dos tecidos humanos, uma vez que os valores máximos de densidades de correntes no modelo podem não estar próximos à fronteira do modelo, que é uma característica imposta na simulação do modelo homogêneo.

Os maiores valores de densidades de correntes induzidas nos perfis, representados por picos nos gráficos dos perfis, correspondem exatamente à passagem pela região de maior valor de condutividade, precisamente a região formada pelo líquido cérebro espinhal.

- O valor máximo registrado no modelo com valores de condutividade de [11] foi de 29,19 $\mu\text{A}/\text{m}^2$;
- O valor máximo registrado no modelo com os valores de condutividade de [45] foi de 14,6 $\mu\text{A}/\text{m}^2$;

Enquanto o valor máximo registrado no modelo homogêneo foi de 3,6 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ na periferia do modelo.

5.5.2 Investigaçāo da variação da densidade de corrente induzida com a freqüência

Nesta etapa investigou-se a possível não linearidade da relação entre as densidades de correntes induzidas com a freqüência, em razão de o modelo heterogêneo ser composto por sub-regiões com grande contraste entre os valores de condutividade.

Considerou-se uma exposição frontal a campo magnético (densidade de fluxo magnético uniforme) de 1 μT e ângulo de fase de 0 °; orientado segundo a direção do eixo z, nas freqüências de 50 Hz e de 60 Hz.

Os valores de condutividade adotados no modelo estão reunidos na TABELA 5.12.

TABELA 5.12: Valores de condutividade obtidos de [11]

Região	Condutividade (S/m)
Cérebro (1)	0,06
Líquido cérebro espinhal (2)	2,0
Crânio (3)	0,01
Couro cabeludo (4)	0,1
Músculo (5)	0,2
Ar (6)	zero

Os resultados da simulação são apresentados em termos da distribuição da densidade de corrente induzida, utilizando-se perfis de cálculo, horizontais e verticais, traçados no plano XY ($Z = 0$).

5.5.2.1 Resultados

Na FIGURA 5.26 é apresentada a distribuição da densidade de corrente induzida como função de 'X' considerando apenas 1 perfil de cálculo para apenas 1 valor constante de 'Y',

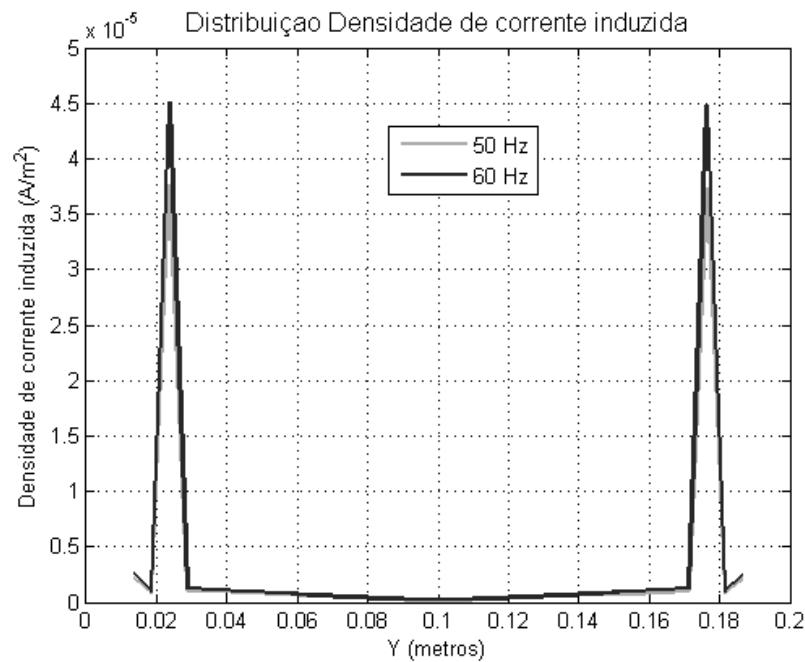


FIGURA 5.26: Perfil horizontal

Na FIGURA 5.27 é apresentada a distribuição de densidade de corrente induzida como função de 'X' para três valores constantes de 'Y', que são os três perfis horizontais de cálculo.

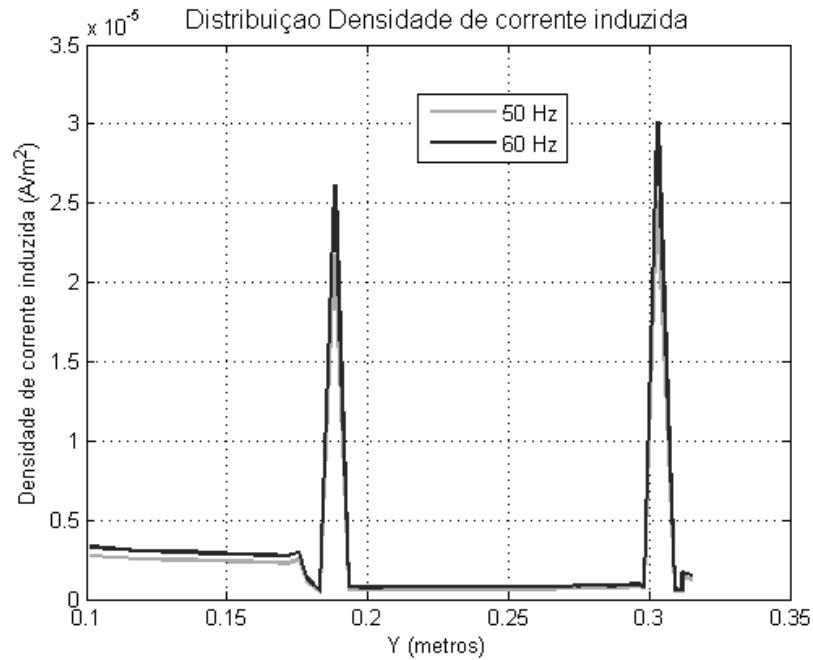


FIGURA 5.27: Perfil vertical

5.5.2.2 Discussão

Para os dois perfis considerados, horizontal e vertical, observou-se que os valores eficazes de densidade de corrente induzida nos modelos quando expostos a um campo magnético de freqüência 60 Hz, são 1,2 vezes maiores que os valores de densidade de corrente induzida para o campo magnético de freqüência 50 Hz.

Isto de certa forma comprova o comportamento linear da densidade de corrente induzida com a freqüência, mesmo em modelos com grandes variações nos valores de condutividade, como a que se verifica na fronteira do cérebro e o líquido cérebro espinhal, onde ocorre uma transição de um valor de 0,06 S/m para um valor de 2,0 S/m, ou seja, 33 vezes superior.

Na TABELA 5.16 são apresentados os valores de densidade de corrente induzidas na região do líquido cérebro espinhal.

TABELA 5.16: Variação dos valores de densidade de corrente induzidas com a freqüência do C.M.

	Módulo da densidade de corrente induzida ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	
	Perfil horizontal	Perfil vertical
C.M a 60 Hz	0,45	0,3
C.M a 50 Hz	0,37	0,25

Estes valores acompanham a relação entre as freqüências conforme mostrado na Equação 5.13.

$$\frac{J_{60}}{J_{50}} = \frac{60}{50} = 1,2 \quad (5.13)$$

onde,

J_{50} é o módulo da densidade de corrente induzida (valor eficaz) na freqüência de 50 Hz e J_{60} é o módulo da densidade de corrente induzida (valor eficaz) na freqüência de 60 Hz.

Os resultados justificam que seja feita a correção dos níveis de referência com a freqüência, conforme indicado nas Diretrizes de exposição. Esta correção na diretriz do ICNIRP, em particular de 50 Hz para 60 Hz, significa uma redução em aproximadamente 20 % do valor da densidade de campo magnético, uma vez que considerando a exposição do público em geral, o limite é de 100 μT (1000 mG) em 50 Hz, enquanto que para a freqüência de 60 Hz é indicado o limite de 83,3 μT (833 mG).

Capítulo 6

Alternativas para mitigação dos níveis de campos elétricos e magnéticos de LT's aéreas e subterrâneas

6.1 Introdução

Um dos fatores a serem considerados no planejamento e projeto de um sistema de transmissão é a necessidade de adequar a intensidade dos campos elétrico e magnético gerados às normas e Leis vigentes.

O gerenciamento de campos eletromagnéticos pode ser definido como a “implementação de programas para minimizar o impacto de possíveis efeitos dos campos elétricos e magnéticos sobre a saúde, mantendo-se a confiabilidade, segurança e efetividade do sistema elétrico de potência” [46]. Desta forma, devem estar em consonância com aspectos de segurança, confiabilidade, preocupações ambientais, estéticas, requisitos de isolamento e afastamentos elétricos, custos, operação e manutenção.]

Entretanto, medidas para redução dos níveis de campo em sistemas de transmissão podem representar custos expressivos para as empresas do setor, que repassados às tarifas de suprimento de energia afetam a própria população.

As técnicas de redução dos campos gerados por instalações elétricas do sistema de potência podem ser aplicadas em dois contextos distintos:

- Linhas novas e subestações novas, onde se desenvolve o projeto de modo a atender aos limites vigentes;
- Linhas e subestações já existentes, tanto no caso de projetos de recuperação quanto em casos onde seja necessário adequar uma instalação a novos limites de campo mais restritivos, em particular em regiões onde se adotem limites inferiores aos das Normas Técnicas e Recomendações, em virtude da decisão de adotar limites baseados no Princípio da Precaução.

Algumas companhias de eletricidade, como por exemplo, a Southern Califórnia Edison Company, têm adotado em suas instalações limites de exposição mais restritivos baseados no Princípio da Preocupação, empregando cerca de 4% do custo total dos projetos novos para medidas de redução de campos elétricos e magnéticos. Contudo, essas alternativas devem permitir uma redução de no mínimo 15% na intensidade do campo magnético.

Neste capítulo a partir da modelagem computacional, baseada nos Métodos dos Elementos Finitos e de Simulação de Cargas/Correntes [29], são mostradas as particularidades de LT's aéreas e subterrâneas, no que se refere aos perfis dos campos gerados ao nível do solo. São apresentadas e analisadas alternativas para redução nos níveis dos campos gerados, especificamente alterações na configuração e a aplicação de técnicas de blindagem [33 – 34], comparando a eficácia dessas medidas através da introdução de um indicador “fator de blindagem”, que consiste na relação entre o campo gerado pela instalação antes e depois da aplicação da técnica. Discute-se também a aplicabilidade de tais soluções em toda extensão da linha ou apenas em trechos próximos a locais considerados de uso sensível, como escolas, creches, hospitais, etc.

6.2 Alternativas de projeto: LT's aéreas ou subterrâneas?

A opção por linhas subterrâneas devido ao seu alto custo está praticamente restrita ao atendimento a áreas urbanas e a situações onde não é possível dispor dos afastamentos adequados para uma linha aérea.

As linhas subterrâneas são normalmente utilizadas em distâncias inferiores a 10 km, representando custos da ordem de 4 a 10 vezes maiores que os custos de uma linha aérea de potência equivalente [47]. A relação entre os custos das alternativas com o nível de tensão pode ser visto na TABELA 6.1:

TABELA 6.1: Relação entre custos de LT's aéreas e subterrâneas em função do nível de tensão [47]

Nível de tensão	Relação entre os custos
115 kV	3,8
230 kV	6,1
345 kV	8,5
400 kV	9,7

A FIGURA 6.1 apresenta o capital investido em novas linhas de transmissão no período compreendido entre 1993 e 2002 nos E.U.A.

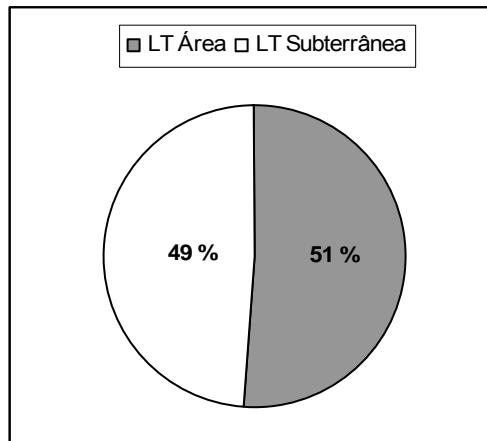


FIGURA 6.1: Capital investido em novas linhas de transmissão no período compreendido entre 1993 e 2002 [47]

Apesar dos números mostrarem certo equilíbrio entre as duas alternativas, deve-se ressaltar que as linhas de transmissão subterrâneas correspondem a menos de 5 % do número total de linhas de transmissão dos E.U.A., e que se relacionados à distância em quilômetros, os números são ainda menores.

Esses números talvez reflitam a tendência das empresas transmissoras em adotar em seus projetos linhas de transmissão subterrâneas, tendo em vista as dificuldades na negociação de faixas de servidão em centros urbanos ou mesmo evitar possíveis dificuldades na obtenção de licenças decorrentes de entraves jurídicos com associações contrárias à construção de linhas aéreas.

Comparando-se o desempenho das duas alternativas com relação aos campos gerados, verifica-se que as linhas subterrâneas devido ao efeito de blindagem da armadura metálica dos seus cabos e da própria característica condutora do próprio solo, não apresentam campo elétrico ao nível do solo.

Os cabos das linhas subterrâneas possuem várias camadas de isolamento (isolamentos térmicos e elétricos) e isso permite que as distâncias entre fases sejam bastante reduzidas principalmente quando comparadas às linhas aéreas. Na FIGURA 6.2 são comparadas as seções de um cabo subterrâneo e de um condutor nu.



FIGURA 6.2: Comparação entre as seções de um cabo e um condutor nu.

Fonte: Flint Energies Electric Cooperative

A menor distância entre as fases dos cabos permite uma atenuação do campo magnético que “compensa” a diferença entre as distâncias mínimas das linhas às áreas de circulação de pessoas: altura mínima dos condutores em linhas aéreas, que em 138 kV é de 9 metros, e profundidade dos cabos em linhas subterrâneas, que é de 1,5 metros, em média.

Este efeito é mais pronunciado transversalmente onde se observa uma grande atenuação na componente horizontal do campo magnético.

A fim de ilustrar as diferenças nos perfis dos campos gerados ao nível do solo por linhas de transmissão aéreas e subterrâneas, são comparadas duas configurações típicas de LT's em 138 kV em perímetro urbano, uma LT aérea com disposição triangular de fases, e uma LT subterrânea com 3 cabos monofásicos. As configurações dessas configurações de LT's estão ilustradas na FIGURA 6.3

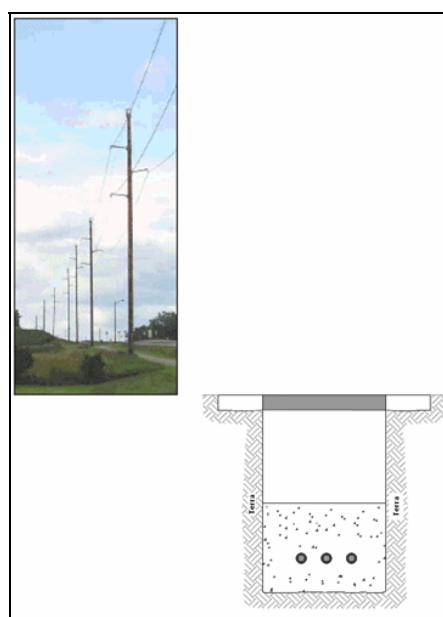


FIGURA 6.3: Ilustração de configurações típicas de LT's aéreas e subterrâneas

Na FIGURA 6.4 é mostrada a comparação dos perfis de campo magnético máximo ao nível do solo de uma configuração aérea e de uma subterrânea, de mesma potência.

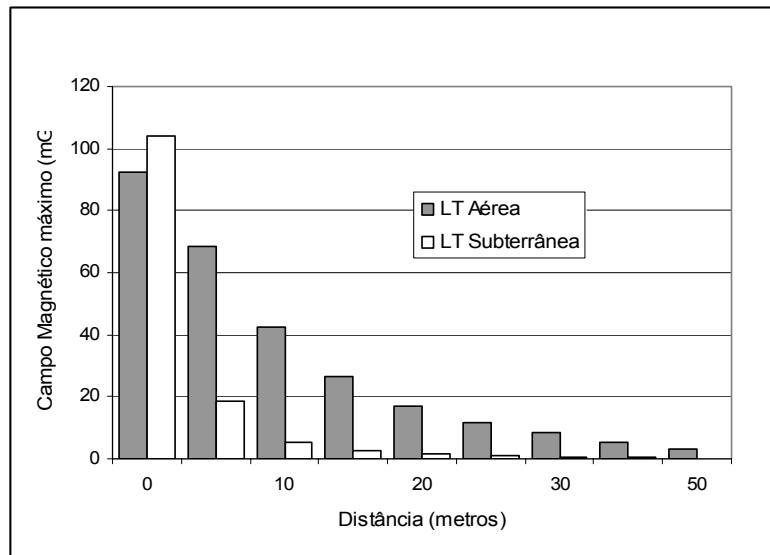


FIGURA 6.4: Perfil de campo magnético máximo a 1 m do solo

6.3 LT's Aéreas

Nesta seção são mostradas as particularidades das LT's aéreas no que se refere aos perfis dos campos gerados ao nível do solo.

São apresentadas e analisadas alternativas para redução nos níveis dos campos gerados, especificamente alterações na configuração e a aplicação de técnicas de blindagem.

6.3.1 Alterações na configuração

Os níveis dos campos elétricos e magnéticos ao nível do solo na vizinhança de uma linha de transmissão para um mesmo nível de tensão são dependentes dos seus parâmetros geométricos. Através de alterações apropriadas no projeto da LT é possível a redução nos níveis dos campos gerados e consequentemente os efeitos desses campos. Deve-se também definir se as medidas serão aplicadas para a redução do campo no interior da faixa de passagem ou no limite da faixa de passagem.

Para realização da análise são considerados os seguintes parâmetros:

- Arranjos (círculo horizontal, triangular e vertical)
- Alturas e flecha
- Dimensões dos condutores

- Dimensão do feixe de condutores
- Distância entre fases
- Cabos pára-raios

1. Arranjo

O efeito da alteração da disposição das fases da LT sobre os níveis dos campos pode ser verificado através da comparação de três configurações de circuitos simples: a horizontal, a triangular ou delta simétrica, e a vertical. Considerando o mesmo nível de tensão, espaçamento entre fases, diâmetro dos condutores e afastamento mínimo fase-solo.

Observa-se que para perfis de campo elétrico ao nível do solo no interior da faixa, a configuração triangular apresenta valores superiores à configuração vertical. No entanto, fora da faixa de passagem a situação se inverte. Tanto no interior quanto fora da faixa de passagem a configuração horizontal apresenta campo elétrico mais elevado [2].

2. Altura da Linha

O aumento da altura da LT se constitui na mais efetiva alteração no projeto para redução do campo elétrico máximo no solo. Entretanto, essa medida requer o uso de torres mais altas, e consequentemente uma maior quantidade de estruturas aumentando o custo por quilômetro da linha de transmissão [2].

3. Flecha

A desconsideração do efeito da flecha no cálculo do campo elétrico em perfis transversais a LT é razoável quando esses são traçados de pontos próximos ao meio do vão (ponto mais baixo da catenária) até distâncias à torre da ordem de 1/3 do comprimento do vão [2].

4. Dimensões dos condutores

Para ocorrer um efeito efetivo deve-se proceder com mudanças drásticas nas dimensões dos condutores. Essa alternativa pelo seu custo e possíveis efeitos, como o efeito corona, não está entre as opções mais atrativas [2].

5. Espaçamento entre fases

Linhas mais compactas produzem campos elétricos mais baixos ao nível do solo. No entanto, essa configuração pode comprometer o seu desempenho frente ao efeito corona e a suportabilidade do isolamento fase-fase. Com isso, pode ser necessário o uso de um número maior de condutores, ou condutores de maior seção, para evitar um aumento da rádio-interferência e ruído audível [2].

6. Cabos pára-raios

Os cabos pára-raios por estarem posicionados acima dos condutores de fase praticamente não exercem influência no campo elétrico ao nível do solo. Sua presença causa redução entre 1 e 2 % [2].

6.3.2 Aplicações de alterações na configuração

Na seqüência por meio de um exercício prático é mostrado o efeito que a alteração em parâmetros como o tipo de arranjo, a altura dos condutores de fase, distância entre fases e dimensão do feixe de condutores, exerce no valor do campo elétrico e no campo magnético máximo no solo. Estes valores foram observados tanto no interior da faixa de passagem quanto no limite da faixa de passagem.

1. Arranjo

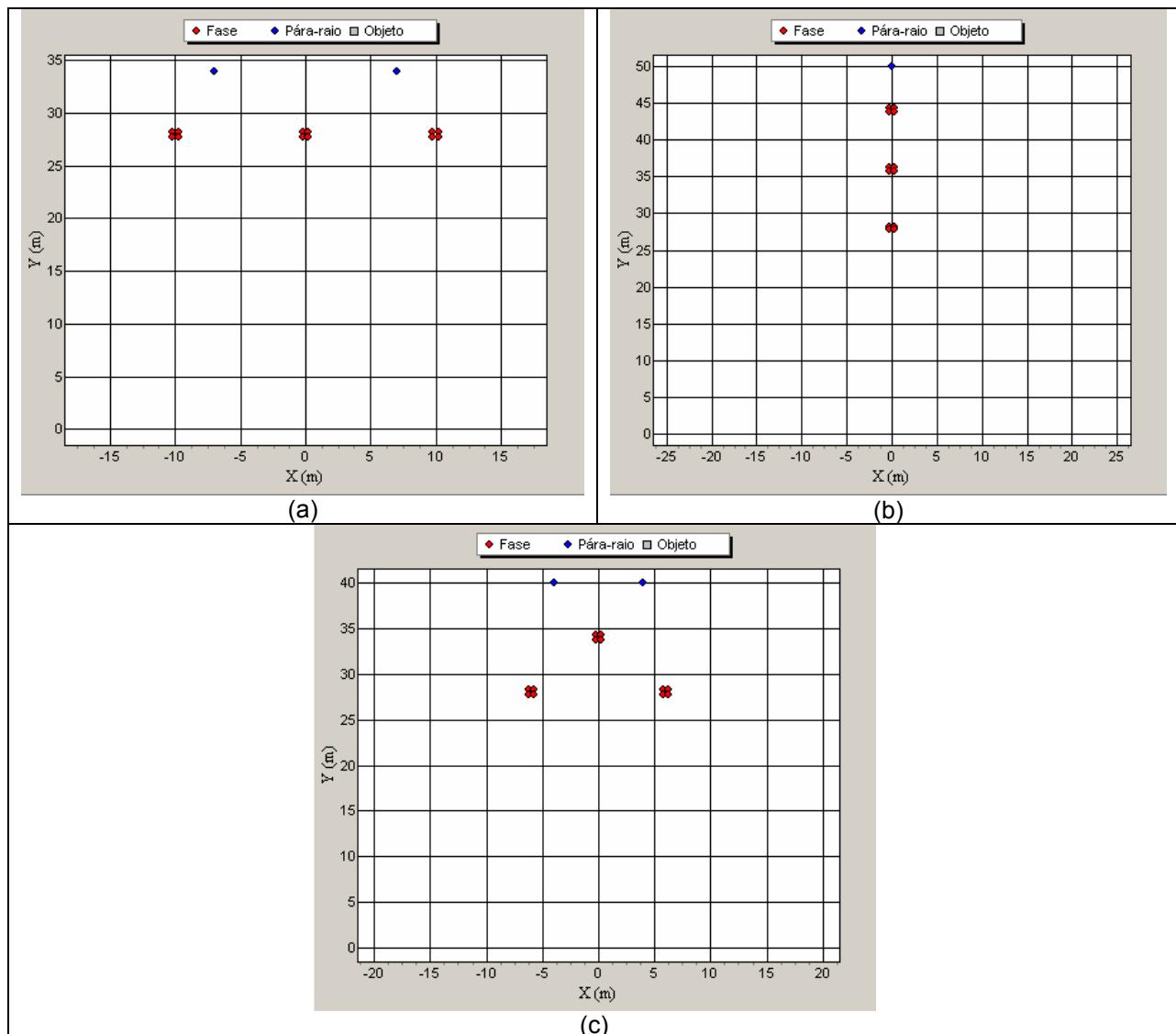
Para a montagem do caso-base, uma LT de 500 kV com arranjo horizontal, foram considerados os parâmetros mostrados na TABELA 6.2.

TABELA 6.2: Configuração do caso base

Parâmetros da simulação	
Tensão máxima operativa (10 %)	550 kV
Corrente de linha	2000 A
Altura dos condutores de fase	28 m
Distância entre fases	10 m
Número de condutores do feixe	4
Espaçamento do feixe	0,45
Tipo de condutor	Rail
Flecha	18 m
Altura dos cabos pára-raios	34 m
Flecha	2 m

Para o cálculo dos perfis de campo elétrico e magnético foi utilizado o Programa CAMPEM, desenvolvido pelo CEPEL. Considerou-se um vão de 400 m e uma faixa de passagem de 50 m.

Na FIGURA 6.5 são mostrados através das janelas de interface do Programa CAMPEM, os arranjos de LT de 500 kV que foram simulados para comparação dos valores de campo elétrico e magnético no interior da faixa e no limite da faixa de passagem à altura de 1,5 do solo.



Os resultados das máximas intensidades de campo elétrico para os três arranjos, obtidos a partir de um perfil transversal a uma altura de 1,5 do solo, são mostrados de forma resumida na TABELA 6.3.

TABELA 6.3: Variação do valor do campo elétrico máximo com o tipo de arranjo

	Campo elétrico máximo no interior da FP (kV/m)	Campo elétrico máximo no limite da FP (kV/m)
Arranjo horizontal	11,3	0,4
Arranjo vertical	10,9	0,3
Arranjo triangular	10,2	0,28

A escolha pelo perfil transversal de cálculo a uma altura de 1,5 m do solo segue à recomendação da NBR 15415, cuja descrição está presente no APÊNDICE C.

Da mesma maneira, os resultados das densidades máximas de campo magnético para os três arranjos, são mostrados de forma resumida na TABELA 6.4.

TABELA 6.4: Variação do valor do campo magnético máximo com o tipo de arranjo

	Campo magnético máximo no interior da FP (mG)	Campo magnético máximo no limite da FP (mG)
Arranjo horizontal	431,8	28,1
Arranjo vertical	276,4	19,6
Arranjo triangular	384,0	16,0

Na seqüência são mostrados os perfis de campo elétrico e magnético para os três tipos de arranjos de LT, distinguindo-se as componentes horizontal e vertical, assim como o campo total.

Para o arranjo Horizontal foram obtidos os perfis transversais de campo ao nível do solo mostrados na FIGURA 6.6

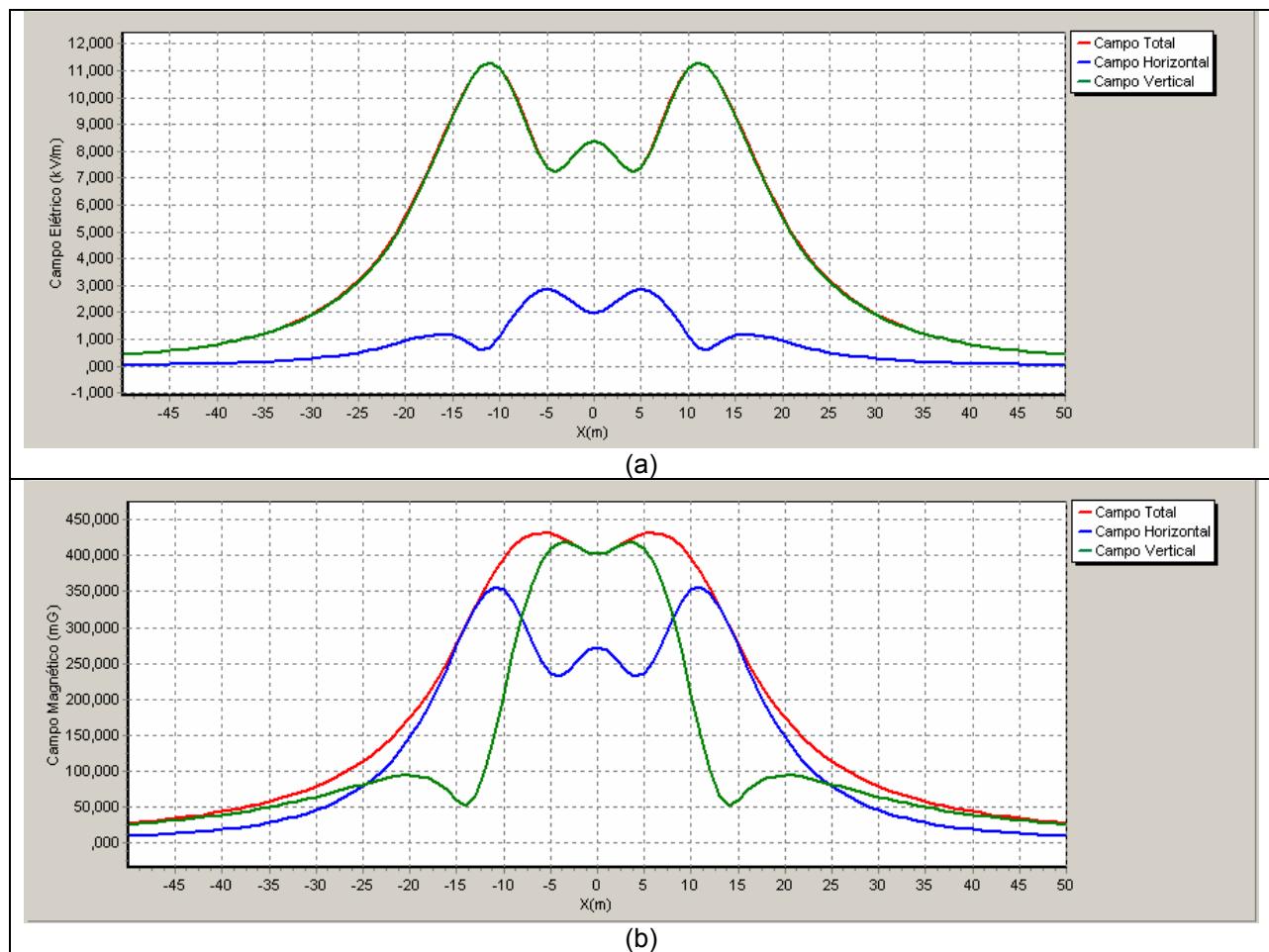


FIGURA 6.6: Perfis transversais de campo elétrico (a) e campo magnético (b), a 1,5 m do solo.

Para o arranjo vertical foram obtidos os perfis transversais de campo ao nível do solo mostrados na FIGURA 6.7.

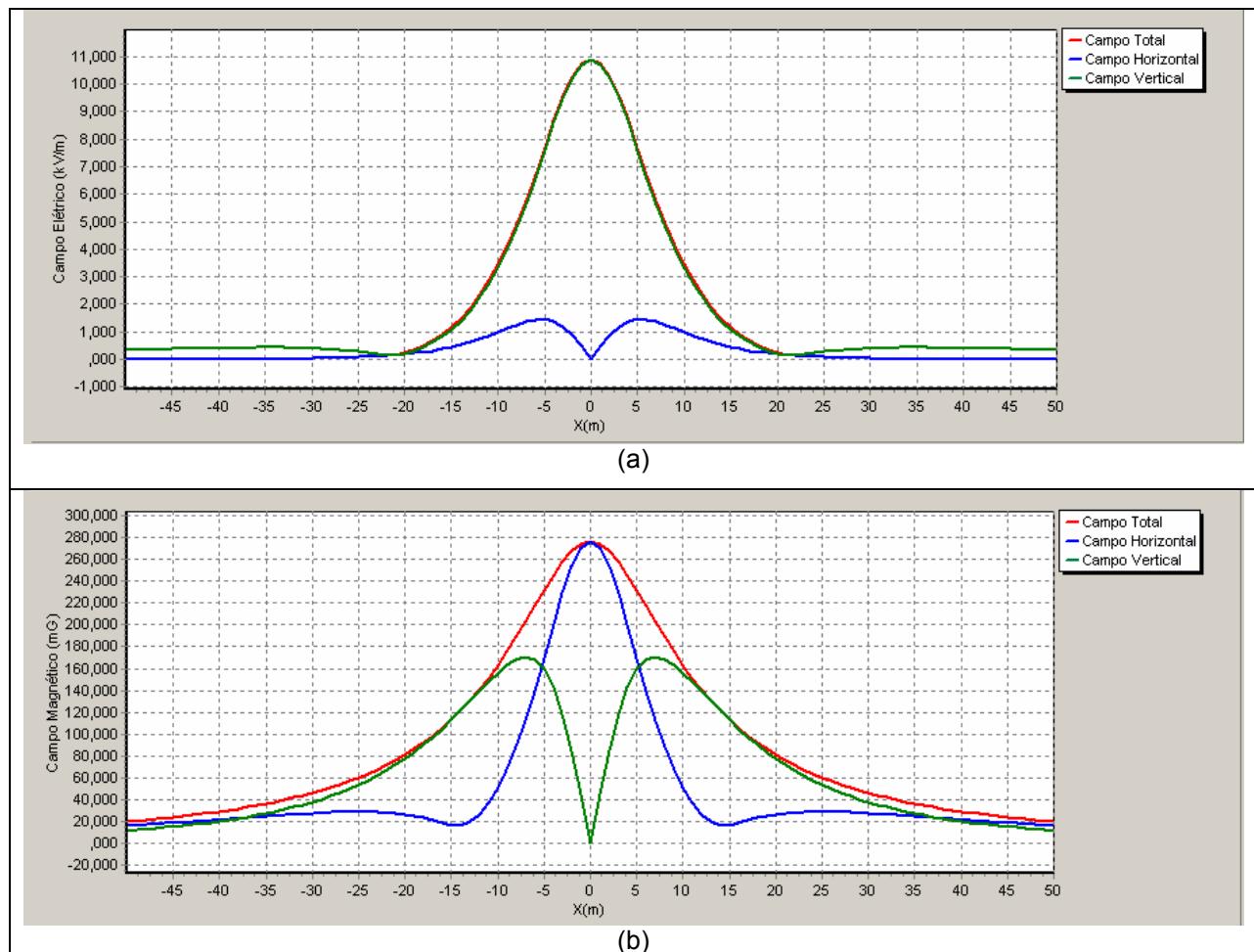


FIGURA 6.7: Perfis transversais de campo elétrico (a) e campo magnético (b), a 1,5 m do solo.

Para o arranjo em delta foram obtidos os perfis transversais de campo ao nível do solo mostrados na FIGURA 6.8.

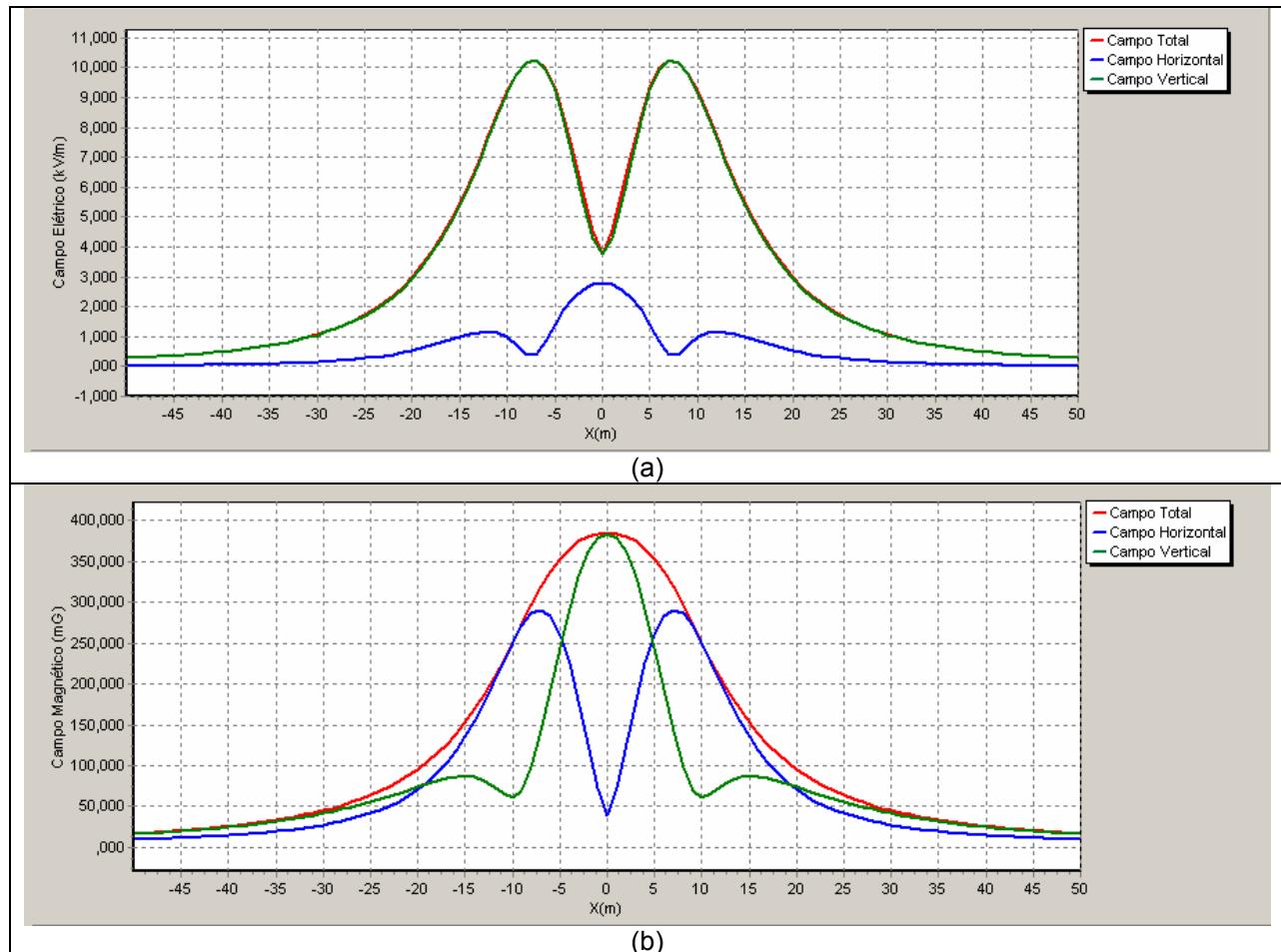


FIGURA 6.8: Perfis transversais de campo elétrico (a) e campo magnético (b), a 1,5 m do solo.

Os campos elétrico e magnético na vizinhança de linhas de transmissão apresentam uma particularidade em virtude de suas componentes espaciais (x, y, z) não estarem em fase. Isto ocorre tanto na aproximação 2D quanto no caso tridimensional completo. Desta forma o campo resultante descreve uma elipse no espaço e o campo máximo, ou campo total, dependerá tanto do módulo quanto do ângulo de fase dos componentes, podendo seu módulo ser igual a um dos componentes (caso da polarização circular - menor campo resultante possível), quanto ser igual ao obtido por composição quadrática (componentes em fase – maior campo resultante possível).

2. Altura dos condutores de fase

Na FIGURA 6.9 é mostrada a variação do valor do campo elétrico máximo com a altura dos condutores de fase, a partir de um perfil transversal de cálculo, no meio do vão, a uma altura de 1,5 m do solo.

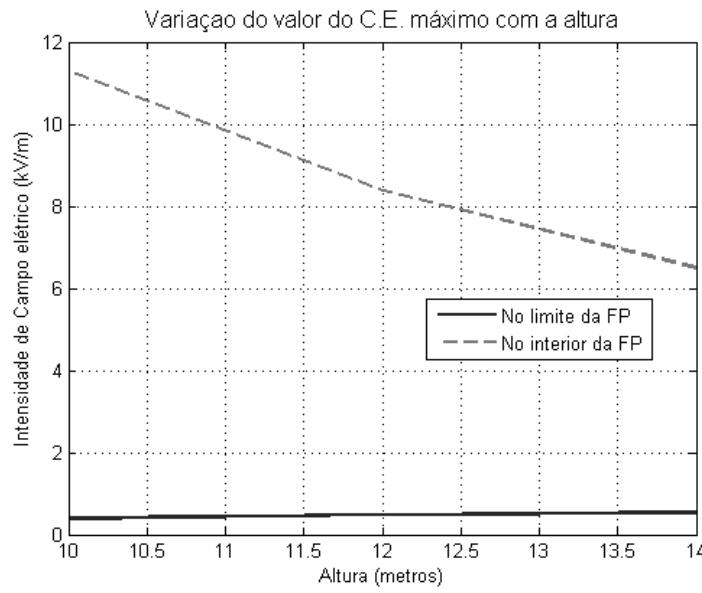


FIGURA 6.9: Variação do valor do C.E. máximo com a altura das fases

Na FIGURA 6.10 é mostrada a variação do valor do campo magnético máximo com a altura dos condutores de fase, a partir de um perfil transversal de cálculo, no meio do vão, a uma altura de 1,5 m do solo.

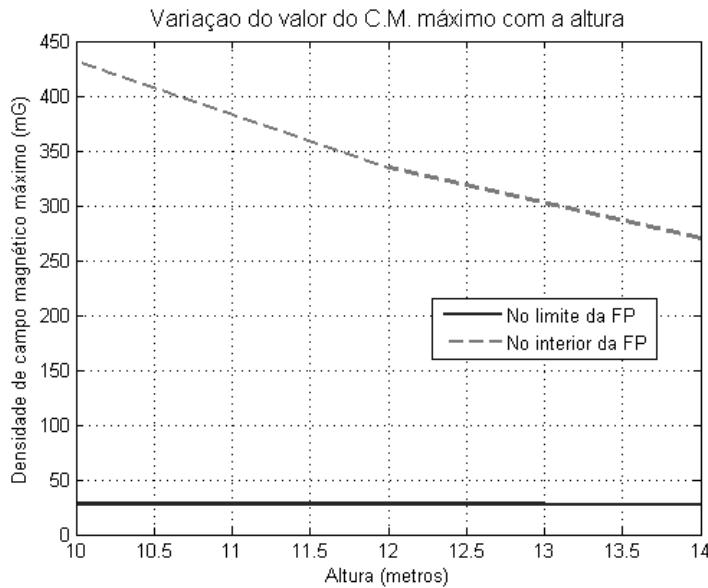


FIGURA 6.10: Variação do valor do C.M. máximo com a altura das fases

3. Distância entre fases

Na FIGURA 6.11 é mostrada a variação do valor do campo elétrico máximo com a distância entre fases, a partir de um perfil transversal de cálculo, no meio do vão, a uma altura de 1,5 m do solo.

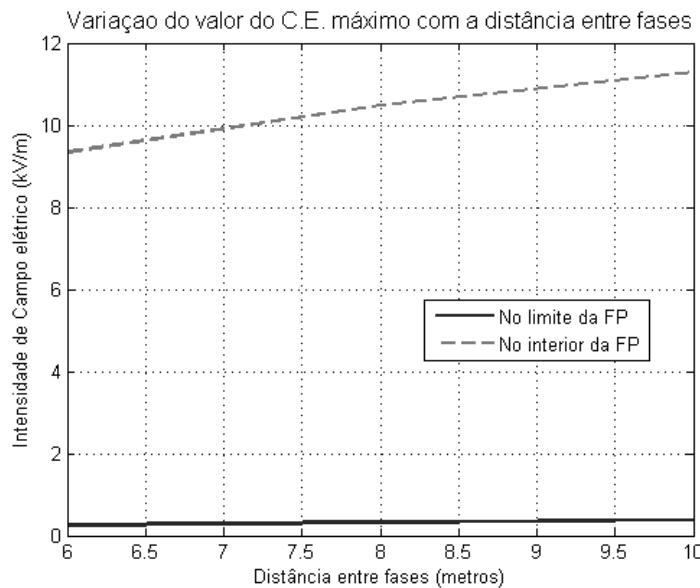


FIGURA 6.11: Variação do C.E. máximo com a distância entre fases

Na FIGURA 6.12 é mostrada a variação do valor do campo magnético máximo com a distância entre fases, a partir de um perfil transversal de cálculo, no meio do vão, a uma altura de 1,5 m do solo.

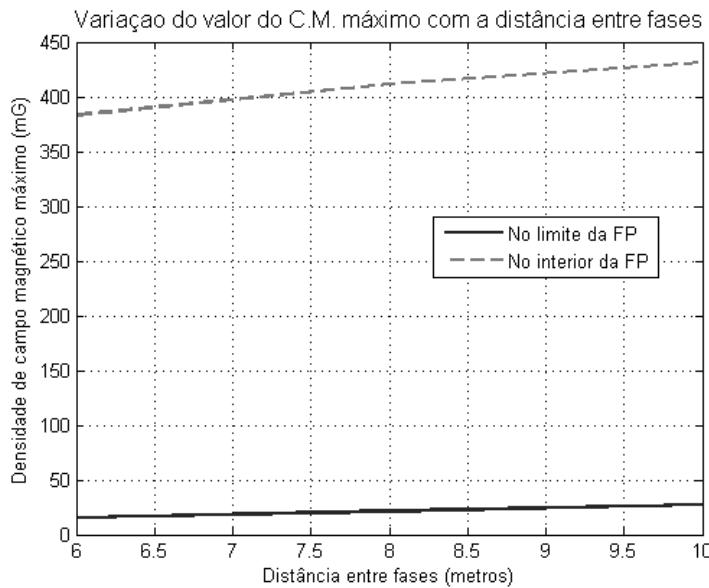


FIGURA 6.12: Variação do C.M. máximo com a distância entre fases

4. Dimensão do feixe de condutores de fase

Na FIGURA 6.13 é mostrada a variação do valor do campo elétrico máximo com a dimensão dos feixes de condutores, a partir de um a perfil transversal de cálculo, no meio do vão, a uma altura de 1,5 m do solo.

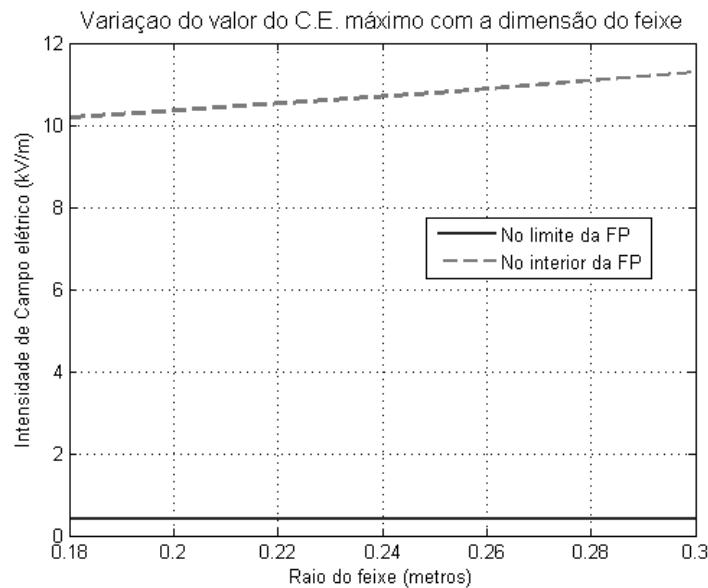


FIGURA 6.13: Variação do C.E. máximo com a dimensão do feixe

Na FIGURA 6.14 é mostrada a variação do valor do campo magnético máximo com a dimensão dos feixes de condutores a partir de um a perfil transversal de cálculo, no meio do vão, a uma altura de 1,5 m do solo.

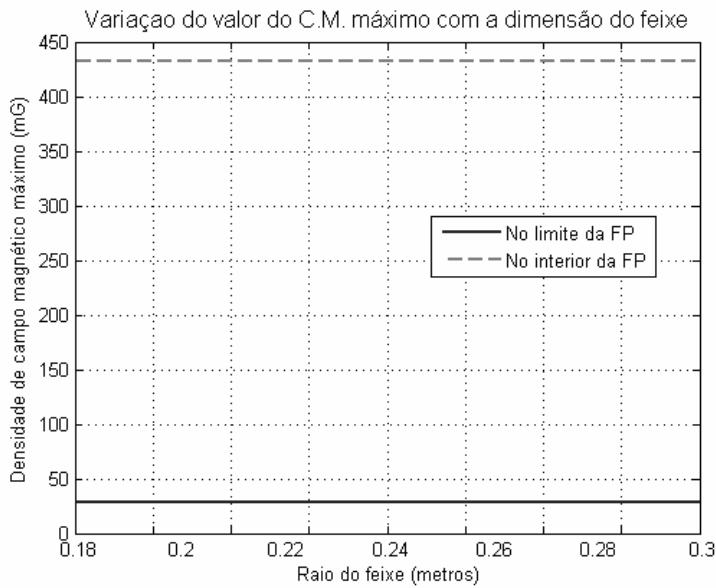


FIGURA 6.14: Variação do C.M. máximo com a dimensão do feixe

6.3.3 Métodos de Blindagem

Neste item serão apresentados métodos utilizados para a redução dos níveis de campos elétrico e magnético produzidos por linhas de transmissão aéreas em corrente alternada. As técnicas estão separadas em técnicas específicas para campo elétrico e técnicas específicas para campo magnético.

▪ **Blindagem ao campo elétrico**

Os métodos que serão apresentados a seguir tratam especificamente da blindagem ao campo elétrico.

1. Condutores aterrados posicionados horizontalmente

Para este método deve-se considerar a variação de parâmetros como, a altura em relação ao solo, o raio dos condutores e o espaçamento entre eles [2].

2. Condutores aterrados posicionados verticalmente

Para este método deve-se considerar a variação dos seguintes parâmetros: altura em relação ao solo, o diâmetro dos condutores, número de condutores utilizados e o espaçamento entre eles. E para uma efetiva proteção devem ser descritas e incluídas também as distância ao centro da linha e as alturas mínimas e máximas dos condutores aterrados [2].

3. Malhas de condutores aterrados

Esta solução consiste basicamente da utilização de condutores horizontais posicionados transversalmente e longitudinalmente no corredor da linha de transmissão [2].

4. Árvores e fileiras de árvores

O uso de árvores ou fileiras de árvores como alternativa para a blindagem ao campo elétrico apresenta uma série de vantagens. Entre elas estão a possibilidade de utilização da própria vegetação natural, o que oferece vantagens no aspecto econômico e também estético, pois evita-se a presença de postes e cabos suspensos. No entanto é necessário acompanhar o desenvolvimento da vegetação, respeitando-se uma distância de segurança aos condutores de fase [2].

▪ **Blindagem ao campo magnético**

Os métodos que serão apresentados a seguir tratam especificamente da blindagem ao campo magnético.

1. Loop Passivo (círculo passivo de compensação de campo)

Consiste no uso de condutores adicionais (auxiliares) em potenciais próximos ao da terra (ou mesmo no potencial da terra) apropriadamente arranjados e conectados de forma a criar um loop, instalados paralelamente à linha de transmissão. A impedância do condutor de blindagem é determinada principalmente pela indutância do condutor, dessa forma, para exercer um controle na corrente induzida e consequentemente aumentar a eficácia da blindagem, utiliza-se uma compensação série capacitiva [49].

Em termos matemáticos a corrente no circuito de compensação pode ser expressa através da seguinte fórmula [49]:

$$i = \frac{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot M \cdot I}{(R + j \cdot 2\pi \cdot f \cdot L)} \quad (6.1)$$

onde,

I representa a corrente do circuito de transmissão,

M é a indutância mútua,

R e L são respectivamente a resistência e a auto-indutância do circuito de compensação.

2. Loop Ativo (círculo ativo de compensação de campo)

Consiste em injetar uma corrente no circuito de compensação através de uma fonte externa. O módulo e o ângulo de fase da corrente são previamente calculados para obter um máximo efeito de redução. Diferentemente do caso de compensação passiva, o valor da resistência não influencia o fator de mitigação e a posição espacial do loop é menos crítica [49].

▪ Técnica Especial

Underbuilt

Esta alternativa se destaca em relação às demais por oferecer blindagem tanto ao campo elétrico quanto ao campo magnético, e consiste essencialmente em posicionar uma LT próxima ou abaixo de uma linha de transmissão com nível de tensão mais elevado.

Em termos práticos essa configuração foi inicialmente proposta para o aproveitamento da faixa de passagem (Tennessee Valley Authority - TVA), mas posteriormente percebeu-se que essa configuração apresentava níveis de campo ao nível do solo bem reduzidos.

Entretanto deve-se ressaltar a dificuldade à realização de manutenção imposta por essa configuração, sendo necessária a desenergização dos dois circuitos de transmissão para a realização de reparos [2].

6.4 LT's Subterrâneas

Nesta seção são mostradas as particularidades das LT's subterrâneas no que se refere aos perfis de campo magnético presente ao nível do solo. São apresentadas e analisadas alternativas para redução desses níveis de campo, especificamente através de alterações na configuração e a aplicação de técnicas de blindagem, comparando a eficácia dessas medidas através de um indicador chamado de “fator de blindagem”, que consiste na relação entre o campo gerado pela instalação antes e depois da aplicação da técnica.

6.4.1 Configuração do circuito

Neste item são descritas ações e decisões necessárias para redução da intensidade dos campos em linhas subterrâneas.

Em circuitos simples, a redução do campo magnético pode ser obtida com a utilização de cabos trifólio ao invés do posicionamento horizontal [48]. Em circuitos múltiplos, mesmo que posicionados horizontalmente, podem ser obtidas reduções significativas no campo magnético máximo através de combinações otimizadas de faseamento [50].

1. Aumento da profundidade

É possível reduzir os valores de campo magnético na superfície do solo aumentando a profundidade de colocação das linhas subterrâneas. Dependendo do tipo de terreno esta alternativa pode ser de alto-custo, pois podem envolver escavações em terrenos formados predominantemente por rochas. Além disso, o aumento da profundidade dos cabos pode reduzir a capacidade de transmissão de potência [48].

Na FIGURA 6.15 é mostrado a eficácia dessa alternativa, onde se compara a relação entre o campo magnético máximo e a profundidade dos cabos através de um perfil ao nível do solo.

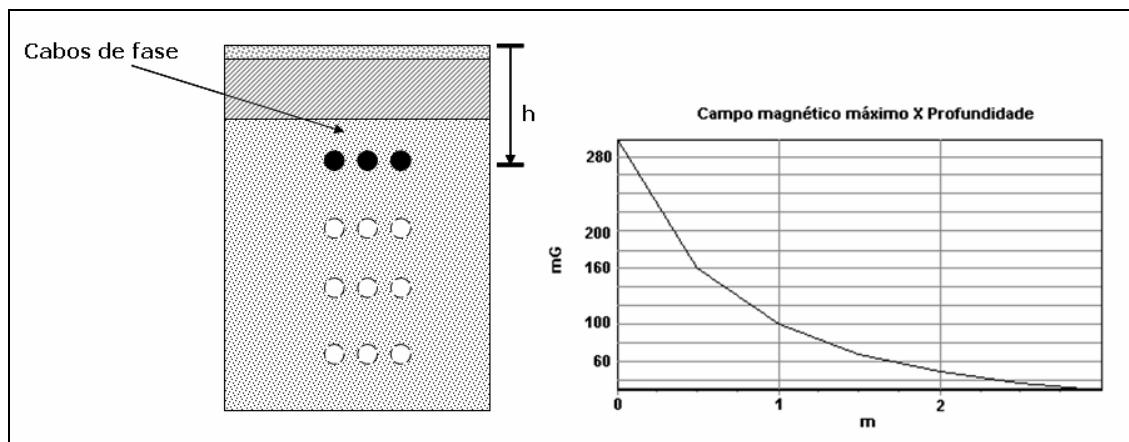


FIGURA 6.15: Comparação entre o campo magnético máximo e a profundidade dos cabos [50]

6.4.2 Métodos de Blindagem

Nessa seção serão apresentados os métodos utilizados para redução dos níveis de campo magnético produzidos por linhas de transmissão subterrâneas em CA.

Para auxiliar na avaliação do desempenho da blindagem será utilizado um indicador chamado de fator de blindagem, F_b :

$$F_b = \frac{B_b}{B_0} \quad (6.2)$$

B_0 : Campo magnético ao nível do solo sem a blindagem;

B_b : Campo magnético ao nível do solo com a presença da blindagem

1. Loop passivo condutor

O posicionamento de condutores acima dos cabos pode reduzir o campo magnético ao nível do solo, particularmente em situações onde há um desequilíbrio das correntes nas fases [49].

2. Duto de aço

Devido tanto à proximidade das fases quanto pelas suas propriedades ferromagnéticas, o duto de aço é extremamente eficiente na redução de campo magnético de um cabo trifásico com correntes equilibradas [49].

Entretanto, as perdas por correntes parasitas e histerese no duto aumentam substancialmente as perdas do sistema, e o aquecimento reduz em muito a ampacidade, sendo talvez necessários dois circuitos para manutenção dos requisitos de ampacidade.

Além disso, falhas nessas configurações tendem a danificar as três fases, aumentando o tempo de restabelecimento e o consequentemente os custos. Desta forma raramente são utilizadas em linhas de transmissão.

3. Placa de alta condutividade

A menor relutância magnética do aço quando comparada a da terra e do ar tende a concentrar e coletar o campo magnético [49].

O caminho de retorno do campo magnético nas extremidades da placa é feito através do solo e do ar, o que pode resultar no aumento do campo magnético nos lados da placa quando comparados ao caso sem a blindagem.

Em geral opta-se por materiais como cobre, alumínio e aço. O cobre possui condutividade mais elevada e uma melhor resistência à corrosão, porém com custo maior que

o alumínio. Do ponto de vista de eficácia, uma chapa de 5 mm de alumínio equivale a uma chapa de 3 mm de cobre.

Devido ao desalinhamento do campo magnético nas bordas, é preciso observar a relação entre a distância da placa aos alimentadores e a largura da placa (L / H). Uma relação ótima é (L/H) igual a 6 [49]. Para redução ao menos do efeito de borda, valores de (L/H) maiores que 2 são comuns. Resolve-se este problema utilizando-se lâminas com formato U ao invés de H.

4. Placa de alta permeabilidade magnética

A placa de material condutor tende a refletir o campo magnético enquanto a placa de material magnético tende a atrair o campo magnético “absorvendo-o”. Consegue-se com esta medida fatores de redução de 0,01, utilizando-se materiais com permeabilidade relativa igual a 20.000, como o μ metal, que entretanto são de custo elevado [49].

6.5 Aplicação de técnicas de blindagem

As medidas de redução de campo magnético para linhas de transmissão subterrâneas são consideradas mais eficazes que as aplicáveis a linhas aéreas, já que conforme foi mostrado, elas possuem menores fatores de blindagem e consequentemente um maior potencial de mitigação.

A criação de áreas de uso sensível com níveis de campo magnéticos inferiores a 10 mG impacta de forma decisiva nos custos de projetos de transmissão já que praticamente inviabiliza projetos de linhas de transmissão aéreas (possibilidade de mudanças de trajetos e rotas), e mesmo as linhas de transmissão subterrâneas, provavelmente teriam que aplicar medidas de redução de campo magnético para de adaptarem a esses níveis reduzidos.

Nesta seção por meio de um exercício prático é mostrado o efeito de algumas técnicas de blindagem aplicadas a linhas subterrâneas na redução da intensidade do campo magnético gerado ao nível do solo, tendo em vista a maturidade das técnicas empregadas em linhas aéreas.

São apresentadas as seguintes soluções para redução do campo magnético ao nível do solo:

- Presença de chapas com alta permeabilidade magnética próximas aos cabos, posicionadas horizontalmente;
- Presença de chapas com alta condutividade elétrica, posicionadas horizontalmente próximas aos cabos.

De forma adicional são avaliados os efeitos que medidas como a alteração da espessura da placa e variação da distância desta aos cabos de fase exercem no valor do campo magnético ao nível do solo.

As simulações realizadas foram baseadas no Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa MEGA.

Na FIGURA 6.16 é apresentada a configuração da LT subterrânea e o resultado de sua implementação no programa computacional.

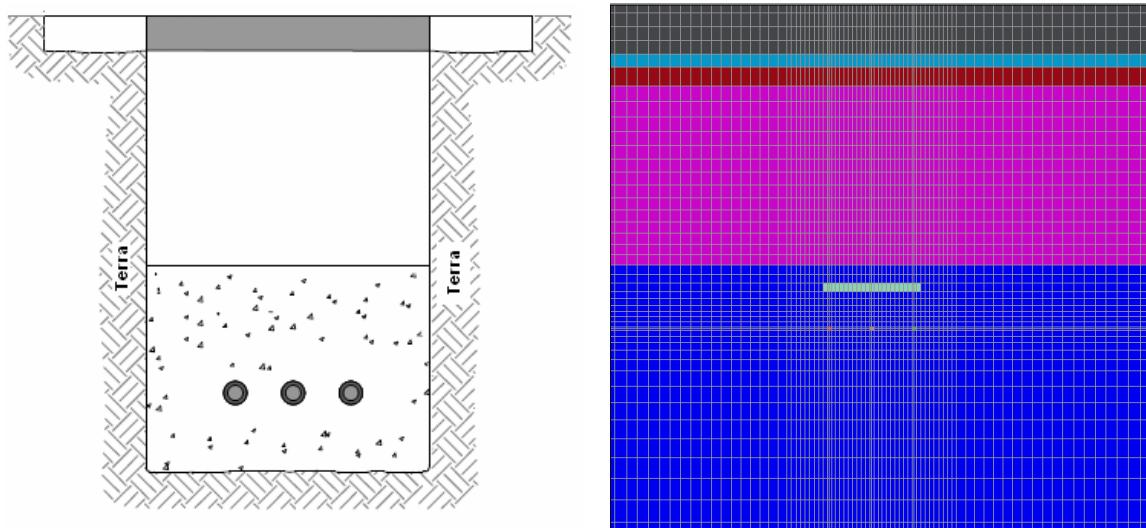


FIGURA 6.16: Configuração da LT subterrânea e sua implementação no programa MEGA

Considerou-se uma distância entre os cabos de fase de 0,2 m, posicionados horizontalmente, e enterrados a uma profundidade de 1,3 m.

Na seqüência são mostradas algumas medidas simplificadoras que foram aplicadas para a realização da simulação assim como os parâmetros de circuito que foram utilizados.

- Considerou-se uma corrente por fase de 800 A, sistema equilibrado com seqüência de fase abc;
- Todas as correntes em apenas uma direção, duas componentes de B e apenas uma componente do vetor potencial magnético – A_z ;
- Domínio do problema - 7 metros a partir do centro da LT;
- Simetria XY e tipo de problema – 2D XY A – Formulação empregando o vetor potencial magnético;
- Condições de contorno – Fluxo tangencial nos laterais direita e esquerda do domínio e fronteira aberta nos contornos superior e inferior.

Na FIGURA 6.17 são explicitadas as regiões consideradas nas simulações, que compreendem a representação de materiais como concreto, solo, e borracha (BackFill), onde se indica também os respectivos valores de condutividades elétricas.

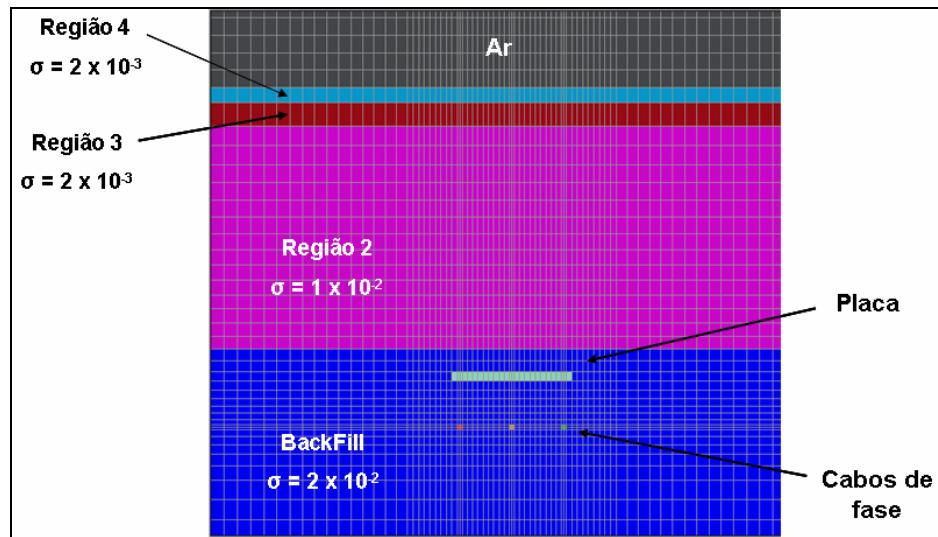


FIGURA 6.17: Implantação no programa MEGA

Foram simuladas quatro alternativas de blindagem para a redução do campo magnético ao nível do solo. As propriedades elétricas e magnéticas dessas alternativas são mostradas na TABELA 6.5.

TABELA 6.5: Alternativas de blindagem

Alternativas	Permeabilidade relativa	Condutividade
A	1,0	$5,8 \times 10^7$ (Cobre)
B	300	$0,11 \times 10^7$ (Aço sem estanho)
C	1,0	$3,82 \times 10^7$ (Alumínio)
D	20000	$0,11 \times 10^7$ (Aço sem estanho)

Além dos perfis transversais de campo magnético ao nível do solo, que são necessários para quantificar a eficácia de cada alternativa, também se investigou através de perfis traçados nas regiões imediatamente acima e abaixo da placa, o comportamento ou a alteração que a presença das placas poderiam provocar na vizinhança dos condutores. Na seqüência são apresentados os resultados desses perfis transversais.

Na FIGURA 6.18 é apresentada o módulo do campo magnético através de perfis na região imediatamente acima da placa, para cada uma das alternativas.

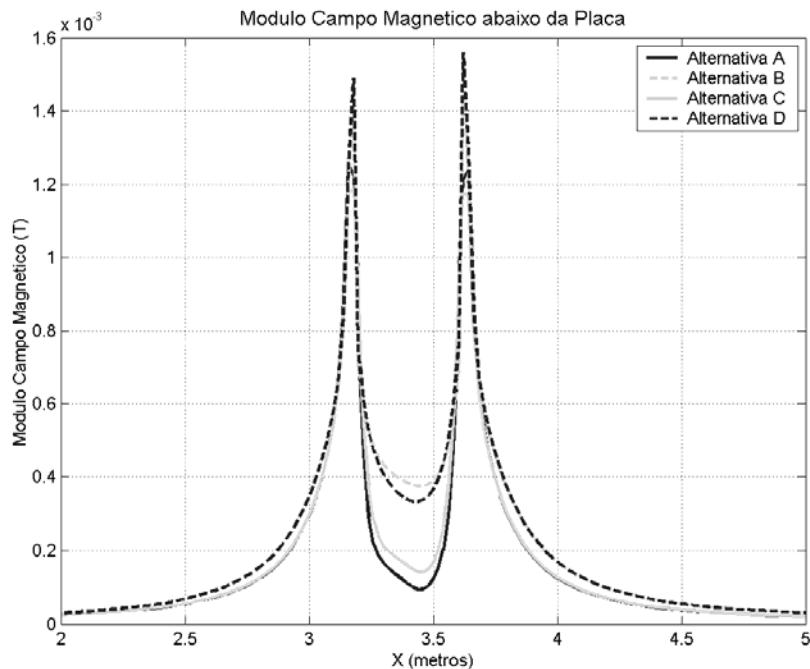


FIGURA 6.18: Perfil do módulo do campo magnético acima da placa

Na FIGURA 6.19 é apresentada o módulo do campo magnético através de perfis na região imediatamente abaixo da placa, para cada uma das alternativas.

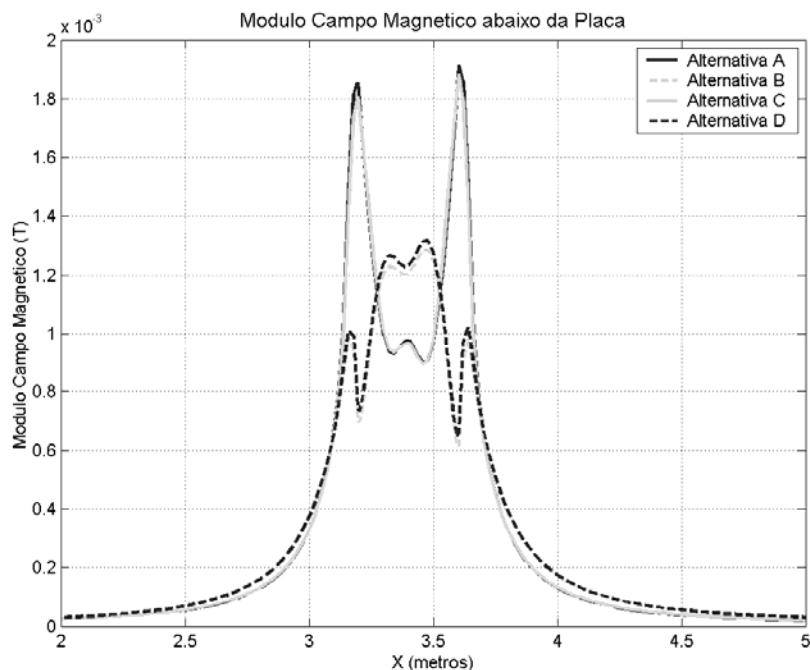


FIGURA 6.19: Perfil do módulo do campo magnético abaixo da placa

Finalmente, na FIGURA 6.20 é apresentada o módulo do campo magnético através de perfis transversal à altura do solo, após serem aplicadas as alternativas de redução dos níveis de campo.

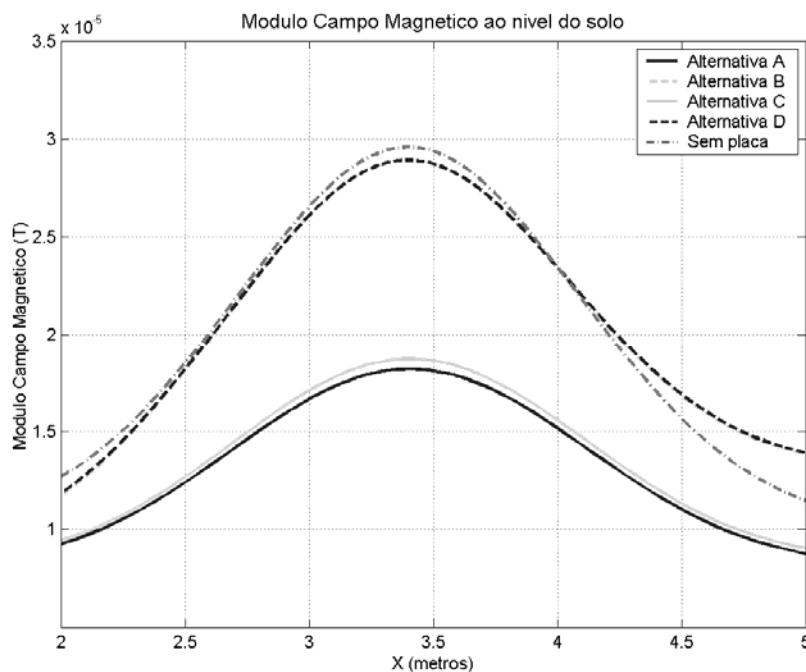


FIGURA 6.18: Perfil do módulo do campo magnético ao nível do solo

Nota-se que o módulo da densidade de campo magnético no nível do solo sem a presença da blindagem é de 29.6 μT . Para se avaliar a eficiência de cada alternativa foi utilizado o indicador fator de blindagem, obtendo-se os resultados mostrados na TABELA 6.6 para as alternativas propostas.

Na TABELA 6.6 estão reunidos os resultados de redução de campo magnético, medidos pelo fator de blindagem, obtidos com a aplicação de cada alternativa de blindagem.

TABELA 6.6: Fatores de blindagem das alternativas de blindagem

Alternativas	Permeabilidade	Conduvidade	FB
A	1,0	$5,8 \times 10^7$ (Cobre)	$F_b = \frac{18,20}{29,6} = 0,6150$
B	300	Zero	$F_b = \frac{28,91}{29,6} = 0,9768$
C	1,0	$3,82 \cdot 10^7$ (Alumínio)	$F_b = \frac{18,72}{29,6} = 0,6324$
D	20000	Zero	$F_b = \frac{28,91}{29,6} = 0,9767$

Os resultados de simulação não mostram qualquer influência da presença de placas de alta permeabilidade magnética na redução do campo magnético ao nível do solo, uma vez que as alternativas B e C apresentaram fatores de blindagem próximos à unidade e, analisando-se os perfis de campo magnético próximo às placas, percebe-se que estes apresentam comportamento semelhante ao caso sem blindagem.

Como esta conclusão contrasta com o afirmado pela referência [49], se faz necessária uma revisão nas simulações dessas alternativas. Nessa revisão serão avaliados aspectos como refinamento na discretização da malha do problema, em especial na região próxima da placa, e possibilidade de avaliar-se as limitações do problema 2D para esse caso.

Uma vez que os resultados das alternativas de blindagem através de alta-condutividade elétrica apresentaram resultados satisfatórios, foram avaliados os efeitos de medidas como a alteração da espessura da placa ou variação da distância desta aos cabos de fase no valor do campo magnético ao nível do solo.

Na FIGURA 6.21 é mostrada de forma ilustrativa as medidas adicionais de redução de campo considerando apenas a presença de placas de alta condutividade.

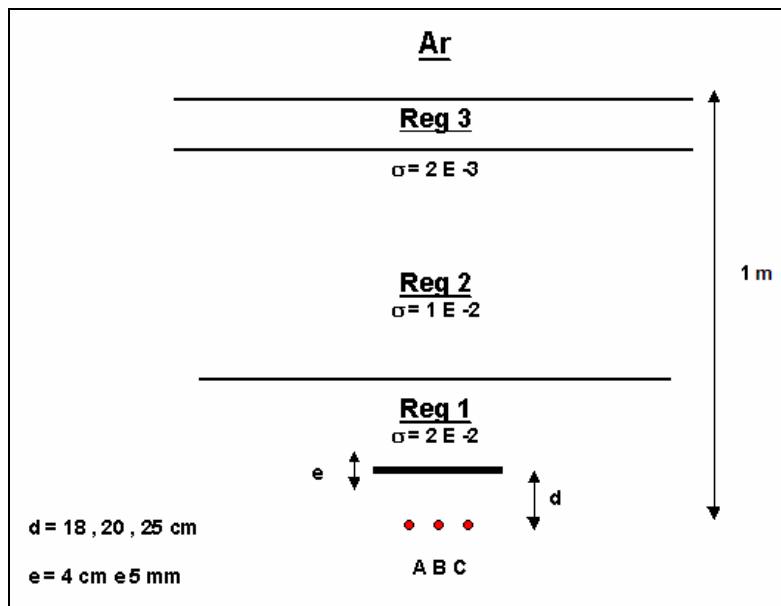


FIGURA 6.21: Esquema com as medidas adicionais de redução de campo magnético para uma placa de alta condutividade elétrica

(a) Alteração na espessura da Placa

Procurou-se através da alteração da espessura da placa observar a relação custo-benefício entre as alternativas de alta condutividade, tendo em vista as grandes diferenças entre o custo de placas de cobre e de alumínio. Alguns autores [49] sugerem inclusive, que do ponto de vista da eficácia, uma chapa de cobre de 3 mm equivaleria a uma chapa de alumínio de 5 mm.

Na FIGURA 6.22 compara-se a influência da redução da espessura da placa no módulo do campo magnético ao nível do solo.

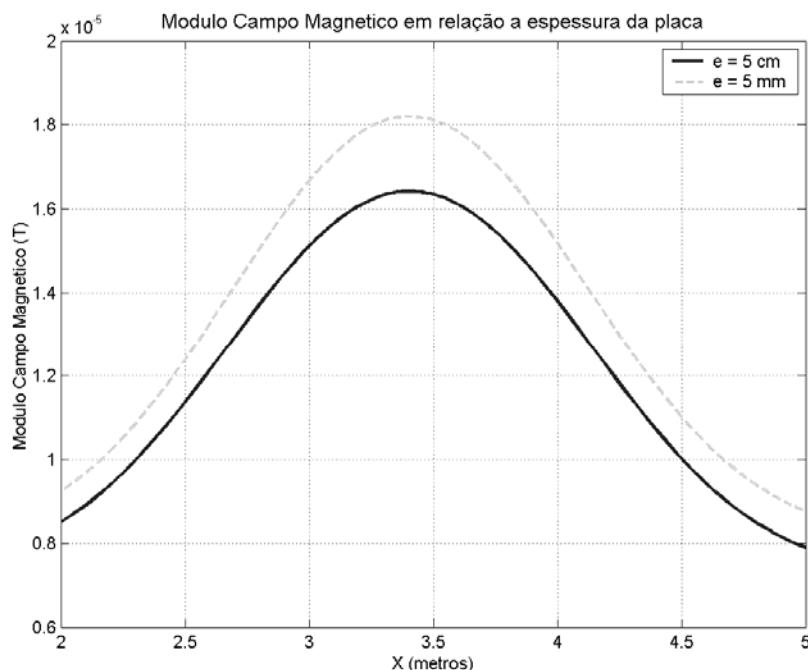


FIGURA 6.22: Perfil do módulo do campo magnético ao nível do solo

- A placa de 5 cm apresentou um fator de blindagem de $F_b = \frac{16,18}{29,6} = 0,5547$
- A placa com espessura de 5 mm apresentou um fator de blindagem igual a $F_b = \frac{18,20}{29,6} = 0,615$

Com a redução da espessura da placa reduz-se em 12,5 % a eficiência da blindagem, no entanto, esta redução do ponto de vista econômico pode proporcionar a redução nos custos de sua aquisição para projetos novos, pois seria necessária uma menor quantidade de material na fabricação e possivelmente facilitaria também o seu processo de laminação.

(b) Alteração na distância da placa aos cabos de fase

Da mesma forma tentou-se chegar a uma relação ótima entre a largura da placa e sua distância aos cabos de fase, baseando-se na afirmação que a relação ótima entre esses parâmetros seria de 6:1, mas a partir de uma relação de 2:1 já seriam perceptíveis a eficácia da blindagem.

A placa de alta-condutividade utilizada nessa avaliação tem uma largura de aproximadamente 0,67 m.

Os resultados do afastamento da placa na redução de campo magnético ao nível do solo serão comparados pelo fator de blindagem e pela relação (L/H).

Na FIGURA 6.19 é apresentado na forma de um perfil do módulo do campo magnético ao nível do solo a influência exercida pelo afastamento da placa aos cabos de fase.

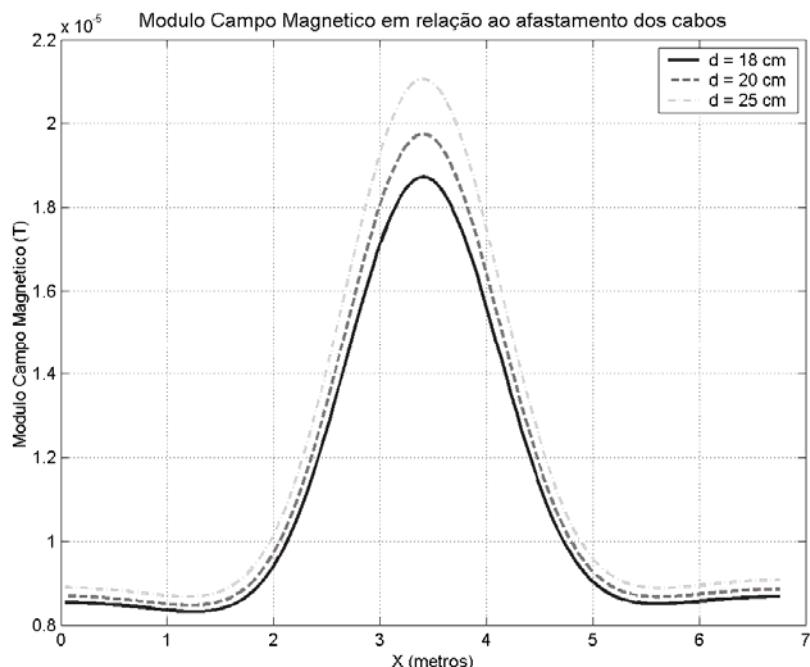


FIGURA 6.19: Perfil do módulo do campo magnético ao nível do solo

- Para a placa posicionada a uma distância de 18 cm dos cabos de fase o fator de blindagem é $F_b = \frac{18,72}{29,6} = 0,6324$ e a relação $\frac{L}{H} = \frac{0,67}{0,18} = 3,72$
- Para a placa posicionada a uma distância de 20 cm o fator de blindagem é $F_b = \frac{19,74}{29,6} = 0,6670$ e a relação $\frac{L}{H} = \frac{0,67}{0,20} = 3,35$

- Para a placa posicionada a uma distância de 25 cm o fator de blindagem é $F_b = \frac{21,06}{29,6} = 0,7115$ e a relação $\frac{L}{H} = \frac{0,67}{0,25} = 2,68$

Embora não se tenha chegado à relação ótima de (L/H), que seria de 6:1, pode-se observar que o aumento dessa relação acompanha o aumento da eficiência da blindagem.

Através da relação ótima entre a largura da placa e a distância aos cabos de fase (L/H), pode-se utilizar nos projetos placas com menores larguras e possivelmente obter redução nos custos de aquisição das placas e consequentemente no custo global da alternativa.

Capítulo 7

7.1 Conclusões Finais

Mostrou-se neste trabalho que a crescente preocupação da opinião pública com os possíveis efeitos biológicos decorrentes da interação entre os seres humanos e os campos elétricos e magnéticos gerados por diversas fontes em seu cotidiano requer que sejam propostas metodologias que possibilitem avaliar a segurança das pessoas à exposição a campos.

Nesta linha, foram apresentados os limites e critérios estabelecidos por Instituições independentes que regulamentam a exposição humana a CEM, como o IEEE e a ICNIRP. Concentrando-se especial atenção na abordagem adotada por cada instituição, para relacionar restrições de valores máximos de densidades de correntes induzidas ou campo elétrico induzido no interior do corpo, com valores externos de campo máximo permitido (limites de exposição). Os documentos dessas instituições mostram que a relação é obtida por meio de modelos analíticos, que representam o corpo humano como se fosse homogêneo (valor de condutividade único), e sob condições bastante particulares de exposição (densidade de campo magnético uniforme e acoplamento máximo com o modelo).

Realizou-se então um levantamento bibliográfico do desenvolvimento e da evolução dos modelos de cálculo, e verificou-se que tanto a geometria do modelo utilizado para representar o corpo humano nas diretrizes quanto às condições de exposição utilizadas na simulação, são bastante simplificadas quando comparadas aos dos modelos dosimétricos de recentes trabalhos publicados.

O estado da arte da dosimetria é calcular o campo elétrico e densidades de correntes induzidas no interior do corpo através da solução numérica das Equações de Maxwell em modelos anatomicamente realísticos de alta-resolução, do corpo humano.

No entanto, para que o modelo dosimétrico seja capaz de representar o corpo humano com fidelidade em um estudo de avaliação de exposição, é necessário que este modelo retrate tanto a geometria quanto as propriedades elétricas o mais próximo possível da realidade.

A incerteza no que se refere ao comportamento dos tecidos humanos na freqüência industrial e a reduzida disponibilidade de dados de propriedades elétricas nessa faixa de freqüência motivaram a realização de uma pesquisa com o objetivo de estimar a permissividade do corpo humano. Utilizou-se nessa pesquisa métodos indiretos, através da análise do campo elétrico externo em torno do corpo. Esta abordagem possibilitou verificar a influência da utilização de amostras de tecidos retiradas de animais mortos nas medições diretas das propriedades elétricas.

A pesquisa mostrou que o valor de permissividade relativa igual a 30 é o mais aderente aos valores medidos na situação de exposição de um voluntário sob um campo elétrico gerado por uma linha de transmissão.

Muito embora o valor encontrado para a constante de permissividade do corpo humano seja inferior em algumas ordens de grandeza aos adotados em diversos trabalhos da literatura, os resultados obtidos mostraram que o modelo apresenta características de interação semelhantes à de um corpo exposto ao campo elétrico em uma situação real.

Na seqüência do trabalho, foram propostos três modelos dosimétricos representativos da região da cabeça para exposição a campo magnético. Estes modelos foram divididos nas categorias homogêneo e heterogêneo, de acordo com o grau de detalhamento geométrico.

Inicialmente observou-se a influência da geometria na distribuição de densidade corrente induzida nos modelos propostos. Os resultados dos perfis de cálculo mostraram que o modelo heterogêneo representa uma evolução geométrica significativa em relação aos modelos homogêneos (esférico e elíptico). Comprovada a confiança no modelo após validação com os modelos analíticos, percebeu-se depois de realizadas simulações com valores de condutividade de duas referências em que se encontraram expressivas diferenças nos valores de densidade de corrente induzida, a importância da determinação correta dos valores de condutividade elétrica adotadas nas regiões do modelo, tendo em vista a sua sensibilidade a esse parâmetro.

Concluiu-se que a determinação precisa dos valores de condutividade de tecidos deve ser considerada como futuro objeto de investigação.

Posteriormente se investigou a possível não linearidade da relação entre as densidades de correntes induzidas com a freqüência, em razão de o modelo heterogêneo ser composto por sub-regiões com grande contraste entre os valores de condutividade.

Os resultados justificam que seja feita a correção dos níveis de referência com a freqüência, conforme indicado nas Diretrizes de exposição.

Os Níveis de referência se constituem em uma ferramenta de imediata verificação do atendimento dos critérios de exposição a campos, embora se deva ressaltar que as Diretrizes impõem fundamentalmente o controle das Restrições Básicas.

Desta forma podem ser vislumbradas soluções de engenharia para redução dos campos elétricos e magnéticos gerados por instalações elétricas, aplicáveis em dois contextos distintos:

- Linhas de transmissão novas e subestações novas, onde se desenvolve o projeto de modo a atender aos limites vigentes;
- Linhas de transmissão e subestações já existentes, tanto no caso de projetos de recuperação quanto em casos onde seja necessário adequar uma instalação a novos limites de campo mais restritivos, em particular em regiões onde se adotem limites inferiores aos das Normas Técnicas e Recomendações, em virtude da decisão de adotar limites baseados no Princípio da Precaução.

Dedicou-se a atenção deste trabalho às Linhas de Transmissão, que pelo fato de se estenderem por grandes distâncias, percorrendo locais com diferentes características físicas e de ocupação de pessoas na vizinhança, possibilitam a aplicação de variadas técnicas de redução de campo.

Inicialmente foram mostradas as particularidades de LT's aéreas e subterrâneas, no que se refere aos perfis dos campos gerados ao nível do solo, e posteriormente tratou-se das alternativas para redução desses níveis, especificamente alterações na configuração e a aplicação de técnicas de blindagem, apresentando resultados de algumas medidas.

Finalmente foram mostrados os resultados de algumas técnicas de mitigação em linhas subterrâneas tendo em vista a maior maturidade das técnicas aplicáveis em linhas aéreas.

Entre essas soluções estavam o posicionamento horizontal de chapas com alta permeabilidade magnética ou de alta-condutividade próximas aos cabos. Uma vez que os resultados da blindagem através de placas de alta-condutividade elétrica apresentaram resultados satisfatórios, foram avaliados os efeitos que medidas como a alteração da espessura da placa ou variação da distância desta aos cabos de fase poderiam exercer no valor do campo magnético ao nível do solo. Encontrando-se configurações ótimas na blindagem, poder-se-ia utilizar nos projetos placas com menores larguras e espessuras, que possivelmente acarretariam redução nos custos de aquisição das placas e consequentemente no custo global das alternativas.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Propõe-se como trabalho futuro a realização de simulações utilizando o modelo heterogêneo, na condição de exposição a um campo elétrico externo, uniforme, nas três direções, e exposição a um campo magnético, uniforme, também nas três direções.

Para a realização da simulação de exposição a campo elétrico, propõe-se a utilização da formulação para altas freqüências disponível no Programa MEGA.

Posteriormente será feita a composição das componentes de densidade de correntes induzida e de campo elétrico induzido em cada direção, quando serão obtidas as densidades totais de corrente nos modelos. Deve-se ressaltar que tal abordagem não é utilizada nas Diretrizes e Normas de exposição que considera que as correntes induzidas não são aditivas.

Propõe-se também a aplicação do modelo heterogêneo na avaliação da exposição humana a campos elétricos e magnéticos em uma situação real, que requer primeiramente o conhecimento completo dos valores espaciais do campo elétrico e magnético, em módulo e fase. E depois de obtido esse mapa dos campos, pode-se então atribuir os valores de entrada para o modelo dosimétrico e finalmente calcular as correntes induzidas e o campo elétrico induzido no modelo.

Um caso prático seria a exposição do trabalhador de uma companhia de eletricidade executando serviços de manutenção em linha viva, próximos aos barramentos de uma subestação, ou próximo aos condutores de fase de uma LT, que são locais e situações de exposição em que está submetido a campos elétricos e magnéticos de alta intensidade e costumeiramente não-uniformes.

Quanto às técnicas de redução do campo magnético gerado por linhas de transmissão subterrâneas propõe-se a análise da utilização de placas híbridas, ou seja, uma placa formada por várias subcamadas de pequena espessura, justapostas, com a alternância de materiais com diferentes características elétricas e magnéticas.

Referências

- [1] Electric Power Transmission at Voltages of 1000 kV AC or \pm 600 kV DC and Above, CIGRE Study Committee 38, Working Group 38-04, UHV Testing facilities and Research Programs, Third Draft, March 1987.
- [2] Transmission Line Reference Book, 345kV and Above, Second Edition, EPRI TL-2500, EPRI, Palo Alto, CA, chapter 8, 1982.
- [3] Biological effects of low frequency electromagnetic fields, chapter 10, Magda Havas. In: D. Clements-Croome (Ed.). 2004. *Electromagnetic environments and health in buildings*. Spon Press, London, 535 pp.
- [4] Korobkova, V.P., Yu.A. Morozov, M.D. Stolarov, and Yu. A. Yakub. 1971. Influence of the electric field in 500 and 750 kV switchyards on maintenance staff and means for its protection. In: *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, Paris, August 1972, CIGRE, Paris 1977.
- [5] Wertheimer, N. and E. Leeper. 1979. Electrical wiring configuration and childhood cancer. American Journal of Epidemiology 109:273-284.
- [6] ACIGH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists): 2000 TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH (2000).
- [7] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Technical Report, ICNIRP, 2001.
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 to 3 kHz (IEEE C95.6-2002). [Standard] Piscataway, N.J.: Subcommittee 3 of Standards Coordinating Committee 28, IEEE Standards Department, 2002.
- [9] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA): Exposure Limits for Electric & Magnetic Fields – 0 Hz to 3 kHz, Public Consultation Draft, Radiation Protection Standard, Public Consultation Draft, December 2006.
- [10] P. J. Dimbylow, "Induced current densities from low-frequency magnetic fields in a 2 mm resolution, anatomically realistic model of the body," Phys. Med. Biol., vol. 43, pp. 221–230, 1998.
- [11] M. A. Stuchly and Trevor W. Dawson, Interaction of Low-Frequency Electric and Magnetic Fields with the Human Body, Proceedings of the IEEE, Vol.88, No.5, May 2000
- [12] Kavet, R., Stuchly, M., Bailey, W.H. & Bracken, T.D., Evaluation of Biological Effects, Dosimetric Models, and Exposure Assessment Related to ELF Electric-and Magnetic-Field Guidelines. Appl. Coopat. Environ. Hygiene, 2001.
- [13] C. POLK, Biological Effects of Low-Level Low - Frequency Electric and Magnetic Fields, IEEE Transactions on Education, Vol. 34, No 3, August, 1991

- [14] NIEHS - National Institute of Environmental Health Sciences. Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. National Institute of Environmental Health Sciences Working Group Report. Portier CJ, Wolfe MS, eds. Research Triangle Park, NC, National Institute of Health, 1998 (NIH Publication No 98-3981).
- [15] U.S. Congress, Office of Technology Assessment, Biological Effects of Power Frequency Electric & Magnetic Fields-Background Paper, OTA-BP-E-53 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, May 1989)
- [16] DOMINGUES, L. A. M. C., et al., 2005, "Caracterização de campos magnéticos em ambientes industriais, urbanos e residenciais" Em: XVIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, grupo XIII, GSQ, Curitiba, Paraná, Outubro.
- [17] Extremely Low Frequency Fields, Environmental health criteria, 238, World Health Organization 2007.
- [18] NRPB (2004b). Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0-300 GHz). Doc NRPB, 15(3), 1-215.
- [19] RPB (2004a). Advice on limiting exposure to electromagnetic fields (0-300 GHz). Doc NRPB, 15(2), 5-35.
- [20] Dosimetry of induced electric fields – EMFRAPID Symposium 3 – Epidemiology findings (April 1998).
- [21] Application of ICNIRP exposure guidelines for 50 Hz power frequency electric fields.
- [22] Deno DW (1977). Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field - measurement and calculation of distribution and dose. IEEE Trans Power Apparatus Systems, 96:1517-1527.
- [23] Reilly, J. P., Mechanism of electrostimulation: Application to electromagnetic field exposure standards at frequencies below 100 kHz.
- [24] DOMINGUES, L. A. M. C.; CRUZ, R. M.; BARBOSA, C. R. N.; MPALANTINOS, A. – “Análise dos Impactos Eletromagnéticos produzidos por linhas de transmissão – Avaliação dos limites e critérios utilizados no Brasil”, XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2007, GIA.
- [25] CRUZ, R. M., DOMINGUES, L. A. M. C., MPALANTINOS NETO, A. e BARBOSA, C. R. N., 2008, “Comparative analysis of electromagnetic fields exposure limits from International Standards” Em: V CEM 2008 – V International Workshop of Electromagnetic Compatibility, Romania, September.
- [26] Kaune WT, Forsythe WC (1985). Current densities measured in human models exposed to 60- Hz electric fields. Bioelectromagnetics, 6:13-32.
- [27] Barchanski, A., Clemens, M., Gersem, H. & Weiland, T., Efficient calculation of current densities in the human body induced by arbitrary shaped, low -frequency magnetic field sources. Journal of Computational physics, 2005.
- [28] Gajsek, P., Electromagnetic Field Dosimetry, 2004.
- [29] O.P. Gandhi, J.F. Deford, H. Kanai, Impedance method for calculation of power deposition patterns in magnetically induced hyperthermia, IEEE Trans. Biomed. Eng. 31 (10) (1984) 644-651.
- [30] Dawson, T.W.; DeMoerloose, J.; Stuchly, M.A.: Comparison of Magnetically Induced ELF Fields in Humans Computed by FDTD and Scalar Potential FD Codes. ACES 11:63–71 (1996).
- [31] Antenna – Human body interaction in wireless communication, Stuchly, M., University of Victoria Antenna & Propagation Society Lecture, 2005.
- [32] Amit Bhaya, Minicurso, Computação paralela: Algoritmo e aplicações, Coppe, UFRJ.

- [33] Dimbylow, P.J.: FDTD Calculations of the Whole-Body Averaged SAR in an Anatomically Realistic Voxel Model of the Human Body from 1 MHz to 1 GHz. *Phys Med Biol* 42:479–490 (1997).
- [34] Gabriel, C., Gabriel, S. & Corthout, E., The dielectric properties of biological tissues: I. Literature. *Physics in Medicine & Biology*, vol.41, pp.2231-2249, 1996.
- [35] Gabriel, S., Lau, R.W. & Gabriel, C., The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz", *Physics in Medicine & Biology*, vol.41, pp.2251-2269, 1996.
- [36] Gabriel, S., Lau, R.W. & Gabriel, C., The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues, *Physics in Medicine & Biology*, vol.41, pp.2271-2293, 1996.
- [37] COLE, K S. (1972). *Membranes, Ions, and Impulses*, University of California Press, Berkeley
- [38] SCHWAN, H.P. (1957). Electrical properties of tissue and cell suspensions, *Advances in Biological and medical Physics*, Vol.5, Academic Press, New York
- [39] HURT, W. D, ZIRIAK, J. M. and MASON, P.A(2000). Variability in EMF Permittivity Values: Implications for SAR Calculations, *IEEE Transactions On Biomedical Engineering*, Vol. 47, No. 3, March.
- [40] DOMINGUES, L. A. M. C.; CRUZ, R. M.; BARBOSA, C. R. N ; MPALANTINOS, A. "Application Of computational dosimetry studies to assess electromagnetic fields exposure conditions near overhead transmission lines", IV CEM - International Workshop of Electromagnetic Compatibility, September 2007, Baia Mare, Romania.
- [41] PHENIX-MEF / TRICAMP PROGRAMS, CEPEL, Technical Report, DOMINGUES, L. A. M. C., FERNANDES, C., DART, F. C., BARBOSA, C. R. N., 1995, "Cálculo de Campo Elétrico pelo Método de Simulação de Cargas", Relatório Técnico 923/95 – DTI/ACET, CEPEL, Rio de Janeiro.
- [42] <http://www.emfdosimetry.org/> . SWANSON, J. Power frequency EMF measurements.
- [43] Visualization of Electric Fields Around a Biological Body, K. Shimizu, H. Endo and G. Matsumoto, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 35. No.5, May 1988
- [44] Mega Manual, Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Bath, Claverton Down, Bath BA2 7AY, United Kingdom
- [45] Chiba, A. & Isaka, K., Application of Finite Element Method to Analysis of Induced Currents Densities Inside Human Model Exposed to 60-Hz Electric Field. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, PAS-103,7, pp.1895-1901, 1984.
- [46] A. S. Farag, A. Al-Sheri, J. Bakhshwain, T. C. Cheng, D. Penn, Impact of electromagnetic field management on the design of 500 kV transmission lines, *Electric Power Systems Research* 40 (1997) 203-238, Elsevier
- [47] SCC Review of underground electric transmission lines, Joint Legislative Audit and Review Comission of the Virginia General Assembly, November 13, 2006.
- [48] Earle C. Bascom III et al., "Magnetic field management considerations for underground cable duct bank", 2005 IEEE Transmission & distribution Conference – New Orleans, Louisiana.
- [49] Inquinamento da campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici - Aspetti tecnici, sanitari, normative e comunicazione del rischio, Capitolo II – Campi Elettrici e Magnetici a Bassa Frequenza in ambiente di vita, Maggioli Editore.
- [50] DOMINGUES, L. A. M. C., CRUZ, R. M., MPALANTINOS NETO, A., BARBOSA, C. R. N., CEDROLA Jr., CORREA, S. L. e COSTA, M. A. C. A., 2008, "Avaliação dos níveis dos campos elétrico e magnético em áreas de livre acesso ao público - Subestação de energia elétrica Florianópolis Agronômica" Em: III SBMARSSE – Seminário Brasileiro de Meio Ambiente e Responsabilidade

Social do Setor Elétrico, Estudos para Planejamento Setorial, Belo Horizonte, Minas Gerais, Agosto, 2008.

Apêndice A

Limitação da aproximação por campos quase estáticos e polarização de campos

1. Campos quase estáticos

Há circunstâncias em que os campos elétricos e magnéticos podem ser determinados como se estivessem desacoplados. Este é frequentemente o caso dos campos próximos a linhas de transmissão, que por variarem tão lentamente no tempo, as equações de Maxwell quase se tornam separadas em equações eletrostáticas e magnetostáticas.

Enquanto que os campos elétricos são associados somente com a presença de carga elétrica, os campos magnéticos resultam do movimento físico da carga elétrica (corrente elétrica).

Um campo elétrico E , exerce forças sobre uma carga elétrica, e é expresso em volt por metro ($V.m^{-1}$). Similarmente, campos magnéticos podem exercer forças físicas sobre cargas elétricas, mas somente quando tais cargas estão em movimento. Campos elétricos e magnéticos têm amplitude e direção (i.e. são grandezas vetoriais). Um campo magnético pode ser especificado em duas maneiras — como fluxo de densidade magnética B , expressa em tesla (T), ou como campo magnético H , expresso em ampère por metro ($A.m^{-1}$). As duas quantidades são relacionadas pela Equação 1:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1)$$

onde, μ é a constante de proporcionalidade (permeabilidade magnética). No vácuo e no ar, bem como em materiais não magnéticos (inclusive meios biológicos), μ tem o valor $4\pi \cdot 10^{-7}$ quando expresso em henry por metro ($H.m^{-1}$). Portanto, na descrição de um campo magnético, para finalidades de proteção, basta especificar uma das grandezas, B ou H .

Numa região de campo distante, o modelo de onda plana é uma boa aproximação para a propagação do campo eletromagnético. As características da onda plana são:

- As frentes de onda têm uma geometria plana;
- **E**, **H** e a direção de propagação (**k**) são todos mutuamente ortogonais;
- $\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$, chamada de impedância de onda.

Para o vácuo, $\frac{E}{H} = 377$ ohms e para campos senoidais em regime permanente, a

impedância de onda $\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$, é um número complexo que inclui as perdas no meio em que a onda está percorrendo;

- **E** e **H** são constantes em qualquer plano perpendicular a **k**.

Na FIGURA A1 é mostrada a direção de propagação da onda plana.

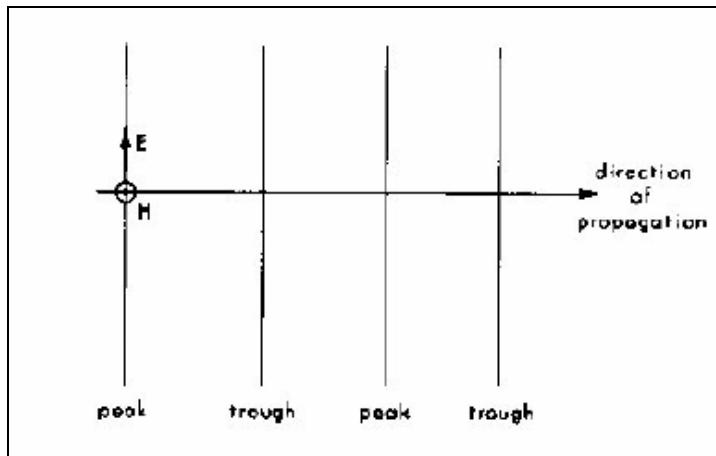


FIGURA A1: Direção de propagação da onda plana

- a densidade de potência **S**, i.e., a potência por unidade de área normal à direção de propagação, está relacionada aos campos elétrico e magnético, pela Equação 2:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E}\mathbf{H} = \frac{\mathbf{E}^2}{377} = 377 \mathbf{H}^2 \quad (2)$$

A situação na região de campo próximo é bem mais complicada, porque os valores máximo e mínimo dos campos **E** e **H** não ocorrem nos mesmos pontos ao longo da direção de propagação, como acontece na região de campo distante. Na região de campo próximo, a estrutura do campo eletromagnético pode não ser homogênea, e pode haver variações

substanciais no valor da impedância de onda (377 W no campo distante); i.e., poderá haver quase exclusivamente campos E em algumas regiões e campos H em outras.

2. Polarização

A correta análise dos graus de polarização dos campos presentes nos diversos ambientes de exposição permite mensurar a segurança das simplificações que podem ser adotadas tanto no cálculo quanto na realização de medições.

A intensidade dos campos elétricos e magnéticos, quando considerados senoidais e em regime permanente, pode ser representada em cada ponto do espaço por um vetor definido por fasores ao longo de três eixos ortogonais, com a mesma freqüência fundamental das correntes e tensões presentes no sistema elétrico.

Nos sistemas polifásicos os campos elétricos e magnéticos gerados são considerados elipticamente polarizados. Isto significa que podem ser representados como um vetor girante, que descreve uma elipse em um plano, para cada ciclo das correntes e tensões nos condutores. Com seu eixo maior representando o módulo e a direção do campo máximo, enquanto o seu eixo menor, o módulo e a direção do campo mínimo após 1/4 de ciclo.

A Equação 3 mostra de que forma é obtido o valor do campo magnético resultante (valor eficaz), na representação elíptica.

$$B_r = \sqrt{B_{\max}^2 + B_{\min}^2} \quad (3)$$

Na FIGURA A2 são apresentados os diferentes graus de polarização do campo magnético, e sob que condições de defasagem entre seus fasores eles ocorrem.

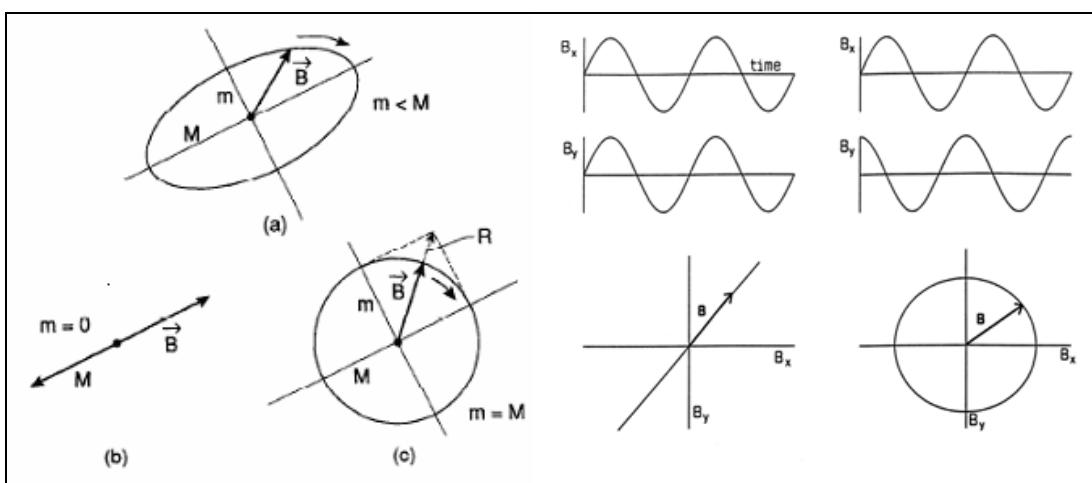


FIGURA A2: Graus de polarização do campo magnético
(a) Elíptica, (b) Linear, (c) Circular

Para as linhas de transmissão polifásicas, o campo elétrico medido a uma distância superior a 15 metros das fases externas, na altura de 1 metro do solo, é frequentemente considerado como um campo monofásico (linearmente polarizado), já que o eixo menor da elipse é apenas uma fração do eixo maior (< 10 %). Observação semelhante pode ser feita com relação ao campo magnético.

Deve-se observar também que os campos magnéticos presentes em casa ou no local de trabalho podem ser elipticamente polarizados.

3. Referências

- [1] IEEE standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines, IEEE Std 644-1994, 1995.

Apêndice B

Fontes naturais de campos estáticos e variantes no tempo

1. Campos Elétricos

São conseqüência principalmente da separação de carga que ocorre entre a Terra e a ionosfera, que funciona como um condutor perfeito separado por ar de condutividade desprezível. Sua intensidade depende de alguns fatores, como a altura, o local, a temperatura, o grau de umidade e da presença de íons na atmosfera. Apresentando como valores típicos, 3 kV/m sob nuvens carregadas e 100 V/m próximo à superfície da Terra. Por sua componente dominante mudar lentamente, o fenômeno é descrito frequentemente como eletrostático [1].

Entretanto, uma diversidade de processos na atmosfera e magnetosfera produz uma grande faixa de sinais com freqüências até alguns MHz.

A intensidade desses campos variantes na freqüência de 5 Hz e 1 kHz são tipicamente menores que 0,5 V/m e suas amplitudes decrescem geralmente com o aumento da freqüência. A intensidade na freqüência de 50 Hz ou 60 Hz é da ordem de 10^{-4} V/m.

2. Campos magnéticos

São conseqüências da soma do campo interno da própria Terra, atuando como um imã permanente, com o campo externo resultante da atividade solar e processos atmosféricos.

O campo geomagnético é conseqüência das correntes elétricas que fluem no núcleo da Terra, e sua intensidade varia entre 35 e 70 μT , dependendo da distância aos pólos. É utilizado por algumas espécies de animais para orientação em sua ação migratória.

Na TABELA B1 estão reunidos diferentes valores de campos elétricos e magnéticos naturais em diferentes condições e localizações.

TABELA B1: Valores de campos elétricos e magnéticos naturais [1]

Campo elétrico estático (kV/m)	
Superfície da Terra	0,13
Altitude de 1000 m	0,045
Próximo a tempestades	0,1 - 3
Campo magnético estático (µT)	
Equador magnético	35
Pólos magnéticos	70
Processos atmosféricos	< 1

3. Referências

[1] ICNIRP (2003). Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0-100 kHz) - review of the scientific evidence and health consequences. (JH Bernhardt, R Matthes, A McKinlay, P.Vecchia, and B Veyret, Eds.).

Apêndice C

Panorama internacional de limites para campos elétricos e magnéticos de baixa freqüência

1. Formas de aplicação dos limites de CEM

Em 1996, a Organização Mundial de Saúde (OMS) diante das preocupações do público em relação aos efeitos da exposição a campos eletromagnéticos, iniciou o Projeto Internacional CEM, tendo como objetivos obter uma resposta internacional coordenada para preocupações com CEM e produzir Normas para exposição, baseadas estritamente em revisões da literatura científica. A ICNIRP, NRPB (atual Health Protection Agency - HPA) e comitês de especialistas em vários países encarregados do desenvolvimento de Diretrizes de exposição adotaram esta abordagem.

Então, desde 1999 têm sido promulgadas medidas para favorecer o desenvolvimento de Diretrizes de exposição e também a sua inserção na estrutura de políticas nacionais e internacionais em campos eletromagnéticos e Saúde. Destacando-se como as principais Diretrizes internacionais tanto pela qualificação dos especialistas envolvidos quanto pela sua independência, as Diretrizes publicadas por ICNIRP e IEEE.

Atualmente a regulamentação e aplicação dos limites de campo são feitas através de:

- Normas e Diretrizes Internacionais – Ex. ICNIRP e IEEE;
- Normas e Diretrizes Nacionais – Ex. ARPANSA;
- Leis – Ex. Suíça (Lei ONIR) e Brasil (Lei Nº 2.576).

Esta incerteza quanto aos efeitos da exposição de longo prazo a campos magnéticos de baixa freqüência tem levado alguns países a adotarem limites de exposição mais restritivos que as recomendações do ICNIRP, baseados no Princípio da Preocupação ou na sua variante, o Princípio da Abstenção por Prudência. Os dois princípios apresentam a seguinte redação:

Princípio da Preocupação - “Política de gerenciamento de risco aplicado em circunstâncias com alto grau de incerteza científica” onde foi determinada uma necessidade em

reduzir o risco de um dano, usualmente através de políticas provisórias, até que pesquisas forneçam respostas conclusivas.

Abstenção por Prudência – "Mesmo sem qualquer risco demonstrável, adotam-se medidas de baixo custo para reduzir a exposição a campos eletromagnéticos."

2. Efeitos a longo prazo e a leucemia infantil

A associação entre campos produzidos por linhas de transmissão e possíveis efeitos sobre a saúde da população exposta a estes campos, tem motivado uma grande discussão nos últimos 30 anos. Destacam-se pelo pioneirismo os trabalhos de [2] e [3].

O resultado deste segundo trabalho repercutiu tanto na comunidade científica quanto na população em geral, gerando grande discussão e produção científica. Este estudo foi repetido em várias localidades, e até o começo dos anos 90 mais de 12 estudos sobre câncer infantil foram publicados. Alguns estudos não encontraram efeitos enquanto outros confirmaram os resultados apresentados por [2][3].

Estudos deste tipo têm sido feitos em vários países desde os anos 80, para determinar se o campo magnético de baixa freqüência pode causar ou favorecer o aparecimento de câncer. Os resultados durante muitos anos foram variados e frequentemente contraditórios. No entanto recentes pesquisas publicadas mostraram-se coerentes e uniformes em afirmar que a exposição a campos magnéticos de baixa freqüência, superiores a 0,4 µT, pode aumentar em até 2 vezes o risco de câncer em crianças.

Conclusão semelhante foi obtida pela Agência Internacional de Pesquisas de Câncer (IARC), que em 2001 classificou o campo magnético de baixa freqüência como potencialmente carcinogênico. Concluindo que campos magnéticos fracos representariam uma possibilidade - embora não provável ou comprovada - de risco de leucemia.

3. Panorama Internacional dos Limites de Exposição

As disparidades entre as Normas ao redor do mundo, não têm contribuído para reduzir a preocupação do público com relação à exposição a campos eletromagnéticos.

Em vista disso, a OMS tem procurado através de seminários internacionais e reuniões de grupos de trabalho harmonizar as Normas de CEM.

Na TABELA C1 é apresentada o panorama internacional dos limites de exposição, que para efeito comparativo encontra-se dividida em quatro categorias:

- Limites ICNIRP
- Limites Equivalentes ao ICNIRP
- Limites Inferiores

- Limites Superiores

Utilizou-se o ICNIRP como referência por este ser avalizado pela Organização Mundial de Saúde. Além dessas categorias foram listados os países que utilizam somente o Princípio da Preocupação como critério, ou que não possuem limites para campos elétricos e magnéticos de baixa freqüência.

TABELA C1: Limites de Exposição a CEM

Limites ICNIRP		Limites similares	Limites superiores	Limites inferiores	Medidas de Preocupação
África do Sul	Portugal	Alemanha	Bélgica	China	Austrália
Áustria	Reino Unido	Hungria	Bulgária	Costa Rica	Dinamarca
Croácia	República da Coréia	Itália	Esvlovênia	Esvlovênia	Luxemburgo
Estônia	República Tcheca	Suíça		Grécia	Suécia
Finlândia	Singapura			Holanda	
França	Taiwan			Israel	
Irlanda	União Européia			Japão	
Malta				Polônia	
				Rússia	

Apesar da emissão de uma Recomendação (1999/519/EC) por parte do Conselho Europeu, fixando os limites de exposição a campos eletromagnéticos para o público em geral nas freqüências de 0 a 300 GHz nos mesmos limites recomendados na diretriz do ICNIRP, e da proposta por parte da Comissão Européia em harmonizar as normas de proteção, o panorama dos limites na Europa permanece não-homogêneo.

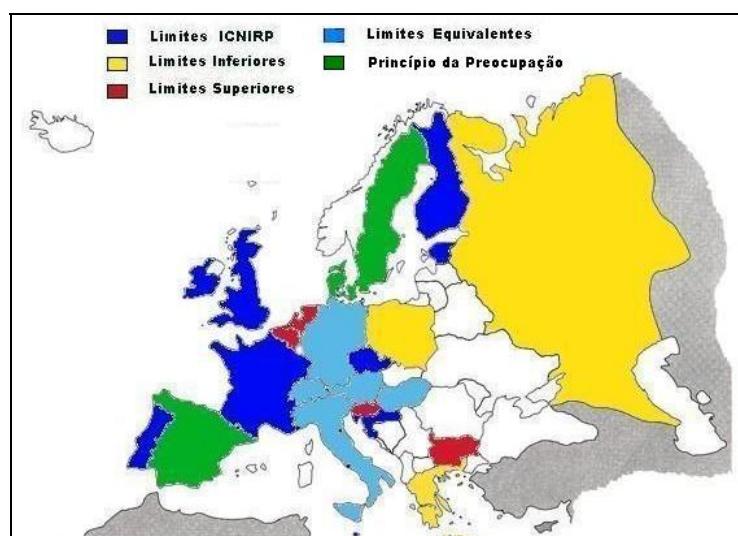


FIGURA 1: Mapa Limites CEM Europa

De modo geral, os países têm adotado a Diretriz da ICNIRP, e em alguns deles, como Itália, Bélgica, Suécia e Suíça, tem tomado uma abordagem de prevenção, em adição ou em substituição à diretriz da ICNIRP. No entanto, apenas Espanha, Suécia e o Reino Unido possuem uma estrutura de comprometimento legal com respeito a campos eletromagnéticos.

A suspeita do aumento do risco de leucemia é uma razão que tem justificado a manutenção da exposição de longa duração ao campo magnético de baixa freqüência tão pequena quanto possível, como medida preventiva. Levando a adoção de medidas para a redução do campo magnético em lugares ocupados por pessoas por longos períodos de tempo, como residências, apartamentos, escolas, parques, playground, hospitais e escritórios.

Isso tem levado alguns países a instituírem zonas chamadas de uso sensível, onde os níveis máximos de exposição são reduzidos, como as próximas a escolas e parques.

Há países que apresentam Normas apenas para alta-freqüência. São os casos de Canadá, Espanha, Filipinas, Nova Zelândia e Turquia.

O Princípio da Preocupação tem sido adotado em países como Dinamarca, Espanha, Luxemburgo e Suécia.

Porém alguns países têm incorporado o Princípio da Preocupação em sua Norma de exposição. São os casos da Suíça e Itália.

Na Suíça a ONIR, Lei relativa à proteção contra radiação não-ionizantes, se aplica sob duas formas:

- Limitando a exposição de curta duração a fim de prevenir danos à saúde aceitos cientificamente
- Como medida preventiva, reduzindo a exposição de longa duração a fim de proteger contra potenciais riscos a saúde.

Para exposição de curta duração os limites seguem as recomendações do ICNIRP.

- Em áreas de uso sensível, ou seja, lugares ocupados por pessoas em grandes períodos de tempo, como residências, escolas, parques, playground, hospitais e escritórios, adotou-se um limite mais baixo ($1\mu T$).

Essa exigência é feita para instalações novas, modificadas e antigas.

A Itália possui limites para público geral semelhantes ao ICNIRP. No entanto para campo magnético possui outros dois níveis:

- Nível de observação igual a $10\mu T$, em caso de exposição maior que 4 horas

- Nível de qualidade igual a 3 μ T, para novas linhas

Lembrando que os valores acima citados são valores médios diários.

A Holanda apresenta uma situação interessante por propor em 2005 através de seu Governo às autoridades locais, a recomendação que não dêem permissão para a construção de novas residências na zona de 0,4 μ T das linhas de transmissão.

A Polônia limita a intensidade de campo elétrico em 1kV/m em áreas residenciais, ou que contenham hospitais, creches e pátios de escolas. Para os outros lugares o limite é 10kV/m.

4. Continente Americano

Os Estados Unidos não possuem Leis federais regulando campos elétricos e magnéticos de baixa freqüência. Entretanto seis estados possuem normas para o campo elétrico gerado por linhas de transmissão e dois deles possuem também limites para campo magnético.

O Canadá possui regulamentação de limite de campo elétrico em 3 províncias, adotadas por companhias elétricas com o objetivo de minimizar o potencial induzido em grandes objetos metálicos e consequentemente o risco de ocorrer choque elétrico. O fato é que as três províncias possuem valores diferentes para a intensidade do campo elétrico no interior da faixa a 1 m do solo. Hydro-Quebec, Hydro One-Ontario e BCHydro-British Columbia , estabelecem 2kV/m, 3kV/m e 5kV/m respectivamente.

5. Brasil

No Brasil, entre as principais ações a respeito da regulamentação da exposição a campos eletromagnéticos estão:

- Desenvolvimento da norma NBR 15415 (Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos nas freqüências de 50 Hz e 60 Hz) que, além de definir os níveis de referência e critérios da ICNIRP para utilização nos empreendimentos no Brasil, ainda define critérios para realização de medições de campo;
- O Projeto de Lei nº 2.576, que dispõe sobre a instalação de fontes emissoras de radiação eletromagnética, em tramitação no Congresso Nacional (Atualmente em processo de aprovação por parte de Comissões no Senado).

a. Requisitos ANEEL

Atualmente no Edital de Licitação de Linhas de Transmissão da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Características e Requisitos Técnicos Básicos das Instalações de

Transmissão, na seção emissão eletromagnética, são exigidos controle dos seguintes aspectos: Corona visual, rádio-interferência, ruído audível, campo elétrico e campo magnético.

A redação contida no edital para os itens campo elétrico e magnético produzidos por Linhas de transmissão é apresentada na seqüência:

i. Campo elétrico

“Sob tensão máxima operativa, o Campo elétrico a um metro do solo, no limite da faixa de servidão, deve ser inferior ou igual a 4,16 kV/m.”

“Deve-se assegurar que o campo no interior da faixa, em função da utilização de cada trecho da mesma, não provoque efeitos nocivos a seres humanos.”

ii. Campo Magnético

“Sob condição de carregamento máximo e no limite da faixa de servidão deve ser inferior ou igual a 67 A/m, equivalente à indução magnética de 83,3 µT.”

“Deve-se assegurar que o campo no interior da faixa, em função da utilização de cada trecho da mesma, não provoque efeitos nocivos a seres humanos.”

Os valores impostos no Edital para o limite da faixa tanto para campo elétrico quanto para o campo magnético são idênticos aos indicados pela Diretriz da ICNIRP.

6. Referências

[1] DOMINGUES, L. A. M. C.; CRUZ, R. M.; BARBOSA, C. R. N.; MPALANTINOS, A. – “Análise dos Impactos Eletromagnéticos produzidos por linhas de transmissão – Avaliação dos limites e critérios utilizados no Brasil”, XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2007, GIA.

[2] Korobkova, V.P., Yu.A. Morozov, M.D. Stolarov, and Yu. A. Yakub. 1971. Influence of the electric field in 500 and 750 kV switchyards on maintenance staff and means for its protection. In: International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, August 1972, CIGRE, Paris 1977.

[3] Wertheimer, N. and E. Leeper. 1979. Electrical wiring configuration and childhood cancer. American Journal of Epidemiology 109:273-284.

Apêndice D

Métodos numéricos

1. Aspectos ligados à eficiência do Método dos Elementos finitos

As aproximações associadas à análise por elementos finitos são decorrentes de duas fontes. São elas:

- Modelagem matemática do problema físico: Erros originados no estabelecimento das condições de contorno
- Aproximações inerentes no processo de elementos finitos

A discretização do domínio é etapa fundamental para sucesso da simulação. A experiência do usuário, que o permite prever, em parte, o comportamento da solução, é essencial antes de empreender a subdivisão da malha. Isso permite identificar as regiões do domínio em que se espera um gradiente elevado da incógnita e então utilizar nessas regiões um refinamento maior na subdivisão da malha.

São consideradas regras gerais para uma discretização eficiente:

- Os elementos não devem ser muito alongados
- O comprimento de um segmento não pode ser superior o de qualquer outro por um fator maior que 2

Em malhas compostas por elementos triangulares, de modo geral, a formação de triângulos eqüiláteros é indicativo de boa formação da malha.

2. Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é empregado para encontrar uma solução aproximada para equações diferenciais parciais, que em eletromagnetismo aplicado seria resolver, por exemplo, as equações de Laplace e de Poisson.

Em um programa comercial que utiliza o método de elementos finitos, as etapas de solução do problema podem ser divididas em três fases de processamento:

- Pré-processamento
- Processamento
- Pós-processamento

Na etapa de Pré-Processamento são definidas pelo usuário as entradas do problema: a geometria, as propriedades elétricas dos materiais e as condições de contorno.

A malha do problema é gerada de forma automática, sendo realizados testes que buscam assegurar que não existam elementos malformados que comprometeriam a solução do problema. Há também a possibilidade de refino da malha utilizando o método triangularização de Delaunay, é claro, caso esta seja composta por elementos triangulares.

3. Descrição dos Programas utilizados

Neste projeto foram realizadas simulações nos programas PHENIX e MEGA, tendo cada um deles sendo utilizado em etapas distintas, assim descritas:

- Modelo geométrico do corpo inteiro em duas dimensões, utilizando simetria axial. (PHENIX)
- Modelo geométrico da cabeça em três dimensões. (MEGA)

A seguir é feita uma breve descrição dos programas comerciais utilizados e de suas funcionalidades:

O Programa PHENIX desenvolvido pelo CEPEL é uma ferramenta de cálculo de campos eletrostáticos em duas dimensões. É dividido em duas classes de problemas, bi-dimensional e a simetria axial, onde a sua escolha está relacionada às características geométricas do modelo problema em questão e as aproximações possíveis de serem adotadas que não comprometam a precisão da solução.

O Programa PHENIX permite ao usuário dispor de formulações adaptadas a cada uma destes tipos de geometria. Neste trabalho devido à simetria do corpo humano utilizou-se a simetria axial vertical (Eixo Y).

Em muitos casos a aproximação 2-D retorna bons resultados. Isto ocorre quando os objetos apresentam em sua geometria certas características.

São elas:

- Grande dimensão em determinada direção: Aplicável como aproximação quando o objeto possui em certa direção dimensões bem superiores às existentes nas outras direções. Um exemplo de aplicação deste tipo de geometria está presente em alguns estudos feitos em máquinas elétricas;
- Simetria em torno de certa direção: Aplicável como aproximação quando objeto apresenta grande simetria, de tal forma a permitir que sua geometria se aproxime a um sólido de revolução. Diferentemente das geometrias bi-dimensional, que não existem na realidade, este tipo de geometria é comumente encontrada. Um exemplo típico de aplicação desta aproximação está presente em estudos da corrosão em isoladores utilizados em linhas de transmissão.

O Programa MEGA é uma ferramenta de cálculo de campos eletromagnéticos em 2D e 3D. Permite ao usuário a escolha por métodos de cálculo que melhor adaptem tanto à formulação quanto à geometria problema. De forma semelhante ao PHENIX, o Programa MEGA permite ao usuário dispor das mesmas classes de problemas em duas dimensões descritas anteriormente.

4. Referências

[1] A SIMPLE GUIDE TO FINITE ELEMENTS, D.R.J. Owen and E. Hinton, Pineridge Press Limited, 1980