

TIAGO DA SILVA GUEDES

**MODELAGEM E MEDIÇÕES DE CAMPOS ELÉTRICOS E
MAGNÉTICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**FLORIANÓPOLIS
2011**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM E MEDIÇÕES DE CAMPOS ELÉTRICOS E
MAGNÉTICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Mauricio V. F. da Luz

Co-orientador: Prof. Dr. João P. A. Bastos

Tiago da Silva Guedes

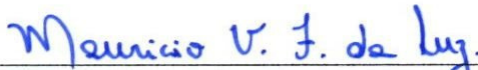
Florianópolis

2011

MODELAGEM E MEDIÇÕES DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

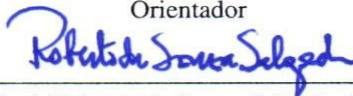
Tiago da Silva Guedes

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



Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

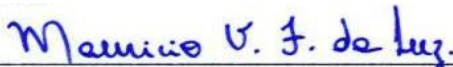
Orientador



Prof. Roberto de Souza Salgado, Dr.

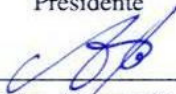
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Presidente



Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr.

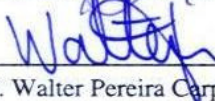
Co-Orientador



Prof. Luiz Antônio Righi, Dr.



Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.



Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz e Prof. João Pedro Assumpção Bastos, pela assistência, incentivo e amizade.

Ao professor e amigo Luiz Antônio Righi, por inúmeras vezes ter ajudado em meu desenvolvimento e ser grande responsável por estar realizando este trabalho.

Ao engenheiro da Eletrosul Dalvir Maguerroski, que possibilitou que as medições fossem realizadas e ao Sr. Itamar Canhada do DOS da Eletrosul.

Aos meus amigos, colegas e professores do GRUCAD pelo ótimo ambiente, convivência, contribuições e respeito.

Ao suporte financeiro da CAPES para a realização deste trabalho, assim como ao Estado e ao Povo Brasileiro que suportam esta agência.

À minha família.

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

MODELAGEM E MEDIÇÕES DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Tiago da Silva Guedes

Abril/2011

Orientador: Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Co-orientador: Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos
Eletromagnéticos.

Palavras-chave: linhas de transmissão, campo magnético, campo
elétrico

Número de Páginas: 93

RESUMO: Este trabalho apresenta como proposta principal a modelagem e a medição de campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão, visando confrontar os resultados com os limites à exposição humana e a conformidade com as demandas da nova legislação vigente no País. Esta análise é realizada através da comparação entre as medições e os resultados calculados analiticamente e numericamente, tendo como objetivo a melhoria dos métodos de medição. É ainda apresentada uma revisão bibliográfica sobre as consequências da exposição aos campos elétricos e magnéticos para a saúde humana. Os resultados obtidos demonstram que os obstáculos urbanos inserem erros nas medições, tendo sido encontrada uma boa concordância entre os resultados para os campos magnéticos e um erro maior para os campos elétricos.

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

MODELING AND MEASUREMENTS OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS IN TRANSMISSION LINES

Tiago da Silva Guedes

April/2011

Advisor: Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Co-advisor: Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: transmission lines, magnetic fields, electric fields

Number of Pages: 93

ABSTRACT: This work presents as main proposal the modeling and measurement of electric and magnetic fields created by transmission lines, aiming to face the real limits of human exposure and the accordance with the demands of the new Brazilian legislation. This analysis is performed by the comparison between the measurements and the results calculated analytically and numerically, in order to improve the methods of measurement. It is also presented a bibliography review on the effects of exposure to electric and magnetic fields on human health. The results obtained show that urban obstacles insert errors in the measurements. However, there is a good agreement found between the results for magnetic fields and a larger error for electric fields.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivações e objetivos do estudo.....	1
1.2	Posicionamento do problema.....	3
1.3	Organização do trabalho.....	4
2	INTERAÇÃO DOS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS COM A SAÚDE HUMANA.....	5
2.1	Estudos sobre as consequências da exposição aos campos ELF ..	5
2.2	Normas de segurança à exposição humana	8
2.2.1	Níveis de referência.....	9
3	TEORIA ELETROMAGNÉTICA E O CÁLCULO ANALÍTICO DE CAMPOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	13
3.1	Cálculo analítico de campos magnéticos em LT	15
3.1.1	Método de Carson	18
3.2	Cálculo analítico de campos elétricos em LT.....	20
4	MODELAGEM NUMÉRICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM REGIME HARMÔNICO.....	26
4.1	Equações de Maxwell e Leis de comportamento em regime harmônico.....	26
4.2	Condições de contorno homogêneas	27
4.3	Formulação forte do campo magnético	29
4.4	Formulação forte do campo elétrico	31
4.5	Discretização pelo método de elementos finitos	33
4.6	Formulação fraca do campo magnético.....	34

4.7	Formulação fraca do campo elétrico	35
5	MEDIÇÃO DE CAMPOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	38
5.1	Medição de campos magnéticos.....	38
5.2	Medição de campos elétricos	39
5.3	O medidor de campos elétricos e magnéticos utilizado	43
5.4	Medição de perfil lateral em linha de transmissão	44
5.5	Relatórios de medições de campos.....	45
5.6	Medição da resistividade de terra.....	46
6	AVALIAÇÃO DE RESULTADOS	48
6.1	Avaliação dos campos magnéticos.....	48
6.2	Avaliação dos campos elétricos	60
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	74
8	ANEXOS.....	76
8.1	Anexo 1 – Folha de dados para medição.....	76
8.2	Anexo 2 – Valores numéricos	77
8.2.1	Valores de M01	77
8.2.2	Valores de M02.....	78
8.2.3	Valores de E01	79
8.2.4	Valores de E02	80
8.3	Anexo 3 – Algoritmos de cálculo de campos em LT	81
8.3.1	Campos magnéticos	81
8.3.2	Campos Elétricos	85
9	BIBLIOGRAFIA	89

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique
ELF	Extremely Low Frequency
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LT	Linha de Transmissão
MEF	Método dos Elementos Finitos
OMS	Organização Mundial da Saúde
UNEP	United Nations Environment Program

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivações e objetivos do estudo

A exposição a campos elétricos e magnéticos pelos seres humanos é tema de estudos científicos desde o final da década de 1970 [1]. Estes estudos foram motivados particularmente pelo temor de que estes campos pudessem promover o surgimento de câncer a quem estivesse constantemente exposto, caso de trabalhadores que realizam a manutenção dos sistemas de energia e daqueles que moram em áreas particularmente próximas às fontes desses campos.

Estes estudos científicos acabam desencadeando rumores na população, que embora na maioria das vezes não possua conhecimento científico do problema, demanda precauções. Como consequência são gerados processos litigiosos com operadores do sistema elétrico, como no caso descrito em [2] de agricultores preocupados com impacto dos campos gerados por linhas de transmissão que passam por suas terras nos produtos que cultivam.

Todavia, o atual interesse das diversas concessionárias e empresas estatais controladoras dos sistemas públicos de energia se deve à sanção da Lei 11.934 [3], de 5 maio de 2009, que dispõe sobre limites de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. Esta lei determina limites ao funcionamento de estações transmissoras de radiocomunicação, de terminais de usuário e de sistemas de energia elétrica nas faixas de frequências até 300 GHz, visando garantir a proteção da saúde e do meio ambiente.

Em seu Art. 4º, a Lei 11.934 determina que, para garantir a proteção da saúde e do meio ambiente em todo o território brasileiro, serão adotados os limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para a exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos e magnéticos gerados por sistemas de energia elétrica.

A Lei 11.934 encarrega o órgão regulador federal de serviços de energia elétrica de editar regulamentação sobre os métodos de avaliação

e os procedimentos necessários para verificação do nível de campo elétrico e magnético, na fase de verificação, comissionamento, e autorização de operação de sistemas de transmissão de energia elétrica. O órgão regulador deve ainda solicitar medição ou verificação, por meio de relatório de cálculos efetuados com metodologia consagrada e verificação de conformidade, na fase de comissionamento, para autorização de operação de novo sistema de transmissão de energia elétrica a ser integrado à Rede Básica Nacional.

A regulamentação definida no parágrafo anterior é realizada pela RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 398 [4] da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que traz informações técnicas adicionais sobre os limites de exposição e exigências para a realização de cálculos e medições.

A Lei 11.934 ainda responsabiliza em seu Art. 16 os concessionários de serviços de transmissão de energia elétrica de realizar medições dos níveis de campo elétrico e magnético ou apresentar relatório de cálculos efetuados com metodologia consagrada e verificação de conformidade, conforme estabelecido pela normatização metodológica vigente. Isto deve ocorrer na fase de autorização e comissionamento de novo sistema de transmissão de energia ou sempre que houver alteração nas características vigentes dos sistemas de transmissão

Além do já exposto, sabe-se do interesse de empresas do setor energético nas metodologias de medição dos campos elétricos e magnéticos, devido às suas necessidades de estar em conformidade com a Lei apresentada e da dificuldade de seus corpos técnicos em obter medições confiáveis para analisar os pontos mais problemáticos.

Em razão dos motivos apresentados, o foco principal deste trabalho é realizar uma análise dos problemas de medição de campos elétricos e magnéticos. Desta forma, têm-se como objetivos:

- Estabelecer uma metodologia ou contribuições para os métodos de medição, realizando uma comparação com resultados analíticos e numéricos.
- Avaliar os procedimentos necessários para a verificação dos níveis de campo.

- Avaliar as metodologias de cálculo.
- Desenvolver o *know-how* necessário para a elaboração de análises e laudos técnicos sobre a conformidade dos campos em linhas de transmissão.

1.2 Posicionamento do problema

O GRUCAD – Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos – realiza pesquisa e desenvolvimento na área de cálculo computacional de campos eletromagnéticos desde sua fundação, em 1984, sendo a grande maioria dos trabalhos voltados ao método de elementos finitos. No estudo dos campos emitidos por linhas de transmissão existem dois trabalhos precedentes realizados no GRUCAD.

Em [5] são apresentadas formulações analíticas e numéricas para o cálculo dos campos elétricos e é realizada uma revisão bibliográfica dos efeitos dos campos elétrico e magnético gerados no organismo humano. Em [6], o trabalho tem como foco principal as técnicas para redução dos campos magnéticos gerados pelas linhas de transmissão, realizando ainda uma revisão do cálculo de campos e da interação entre os campos e os seres vivos.

O cálculo dos campos gerados por linhas de transmissão (LT) pode ser realizado através de métodos analíticos e numéricos. O cálculo analítico de campos magnéticos possui importante marco na década de 20 do século passado, quando J. R. Carson publica sua formulação [7] para o cálculo de campos para linhas de transmissão aéreas. Esta formulação foi desenvolvida para análise de sistemas de telecomunicações (alta frequência) e que, em sua forma simplificada, pode ser aplicada para as linhas de transmissão de potência (baixa frequência) [8]. Esta formulação analítica é amplamente utilizada para soluções em eletrotécnica, sendo aplicada em diversos trabalhos até os dias atuais com bons resultados [9]. De forma análoga, o Método de Simulação de Cargas (MSC) é um método analítico clássico para a determinação dos campos elétricos. Este método é aplicado com sucesso nos estudos em alta tensão desde a década de 1950 [10].

A partir da década de 1970, o cálculo de campos ganhou novo impulso devido à evolução dos computadores eletrônicos. Isto permitiu o desenvolvimento de várias técnicas numéricas para o cálculo de campos elétricos e magnéticos [11] [12]. No mesmo período surge a discussão sobre o impacto sobre o meio ambiente e sobre a saúde dos campos gerados por linhas de transmissão, que culmina nas normatizações geradas nas mais diversas partes do mundo nas décadas de 1990 e 2000 [2].

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho é dividido em sete capítulos e três anexos. Neste primeiro capítulo são expostos as motivações e os objetivos deste trabalho.

No capítulo 2 é realizada uma exposição sobre a interação dos campos elétricos e magnéticos com a saúde humana e é feita uma explanação sobre os níveis de segurança, normas, leis e instituições que a delimitam.

No capítulo 3 é realizada uma breve revisão de eletromagnetismo e apresentam-se as formulações analíticas para o cálculo dos campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão.

No capítulo 4 são apresentados os métodos e formulações para o cálculo numérico dos campos em estudo.

No capítulo 5 é feita uma revisão das normas de medição e considerações sobre as medições realizadas.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos, realizando-se uma comparação e análise entre eles.

Por fim, no capítulo 7, apresentam-se as considerações finais do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Os anexos trazem um exemplo de folha de dados para medição, os valores das medições e cálculos analítico e numérico realizados, além dos algoritmos para o cálculo analítico dos campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão.

2 INTERAÇÃO DOS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS COM A SAÚDE HUMANA

O estudo de campos elétricos e magnéticos em extrema baixa frequência (ELF < 300 Hz) emitidos por dispositivos pertencentes aos sistemas de potência se justifica pela possibilidade destes causarem impacto na saúde dos seres humanos, sendo a emissão de campos considerada uma forma de impacto ambiental [1].

A exposição prolongada a estes campos é foco de inúmeros estudos, tanto *in vitro* como *in vivo*, não havendo um consenso sobre os resultados obtidos, muitas vezes gerando resultados que permitem diferentes interpretações. Estudos epidemiológicos também não conseguem ter resultados cabais, mantendo a incerteza sobre o assunto [13] [14].

A Agência Internacional para a Pesquisa sobre o Câncer (IARC) classifica os campos magnéticos ELF como possivelmente cancerígenos, baseado principalmente em estudos epidemiológicos da leucemia infantil [15].

A Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP) é a autoridade mais importante a determinar os níveis seguros para a exposição aos campos ELF, sob a chancela do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e da Organização Mundial da Saúde (OMS).

2.1 Estudos sobre as consequências da exposição aos campos ELF

A radiação não ionizante, da qual os ELF fazem parte, não possui a capacidade de quebrar moléculas genéticas [16]. Entretanto, é bem conhecido que existem mecanismos biofísicos que levam a efeitos adversos para a saúde como consequência da exposição a campos suficientemente fortes. Em baixas frequências ocorre a estimulação de nervos e músculos devido a correntes induzidas [15], além de produzir

mudanças na excitabilidade de células nervosas do sistema nervoso central [14].

A interação de campos elétricos variantes no tempo com o corpo humano resulta em um fluxo de cargas elétricas, criando polarização no corpo e a reorientação dos dipolos presentes nos tecidos biológicos. A magnitude desses efeitos depende das propriedades elétricas do corpo (permissividade e condutividade elétrica), que variam de tecido para tecido e com a intensidade e a frequência da fonte.

A interação dos campos magnéticos variantes no tempo resulta em campos e correntes elétricas induzidas. Novamente, a magnitude desses efeitos depende das características do corpo e da fonte, dependendo da frequência em que o campo varia, da condutividade dos diferentes tecidos do corpo e de suas formas [16].

Os efeitos de estimulação de músculo e nervos, mudanças da excitabilidade do sistema nervoso central e mudanças na percepção visual são causados por campos extremamente intensos e que não são encontrados no cotidiano da maioria da população, caracterizando efeitos de curta duração devido à exposição aguda a altos níveis. Entretanto, muita pesquisa científica tem sido feita examinando os efeitos potenciais da exposição de longo prazo a campos de baixa intensidade.

Na Tabela 2.1 são expostos os efeitos causados pela exposição a campos magnéticos ELF em frequência industrial [17].

Tabela 2.1 - Efeitos biológicos de curta duração dos campos magnéticos.

B	Efeito biológico
Ente 0,1 e 0,5 mT	Pouquíssimos efeitos biológicos registrados. Mudanças no metabolismo do cálcio e supressão na produção de melatonina
Entre 0,5 mT e 5mT	Mudança na latência de resposta em testes complexos de raciocínio; sensações visuais oscilatórias, conhecida como fosfenos magnéticos
Entre 5 e 50 mT	São excedidos os limiares para mudanças agudas na excitabilidade do sistema nervoso central e outros efeitos agudos

Mais de 50 mT	Provocam excitação neural e podem produzir efeitos biológicos irreversíveis, tais como fibrilação cardíaca
---------------	--

O risco de exposição de longo prazo a campos magnéticos ELF foi focalizado na leucemia infantil. Em 2002 a IARC classificou os campos magnéticos ELF como “possivelmente carcinogênico” para humanos. Esta classificação é usada para denotar um agente para o qual existe uma limitada evidência de carcinogênese em humanos (outros exemplos incluem café e emissões em processos de soldagem). Esta classificação é baseada em análise de dados agregados de estudos epidemiológicos, demonstrando um padrão consistente de incremento de duas vezes na leucemia infantil associada a uma exposição média residencial a campos magnéticos de intensidade 0,3 a 0,4 μT [14].

Entretanto a evidência epidemiológica é enfraquecida por problemas metodológicos, tais como o potencial viés de seleção [15] [14]. Adicionalmente, não há um mecanismo biofísico aceito que pudesse sugerir que exposições de baixo nível de intensidade estão envolvidas no desenvolvimento de câncer. Portanto, se há algum efeito biológico, seria através de um mecanismo biológico ainda desconhecido. Em suma, a evidência relacionada com a leucemia infantil não é forte o suficiente para ser considerada causal [15].

Vários outros efeitos adversos sobre a saúde têm sido estudados para uma possível associação com campos magnéticos ELF. Eles incluem outros tipos de câncer em crianças e adultos, depressão, suicídio, distúrbios cardiovasculares, disfunções na reprodução, distúrbios no crescimento, alterações imunológicas, efeitos neuro-comportamentais e doenças neuro-degenerativas [14]. O Grupo de Trabalho da OMS concluiu que as evidências científicas que sustentam que a exposição a campos magnéticos ELF como causa para todos os problemas citados sobre a saúde é muito mais fraca que para leucemia infantil. Em alguns casos não existe qualquer evidência.

Há evidências estatisticamente significativas de estudos epidemiológicos que utilizam o “código de cabos” de que crianças que residem próximas a LT's têm probabilidade 1,5 vezes maior de

desenvolver leucemia [17]. Este código é a uma classificação de valores de campos magnéticos produzidos em linhas de transmissão em relação aos cabos utilizados para sua construção e levando em consideração a distância das residências.

Em análise apresentada em [17] foi realizado um estudo laboratorial *in vivo* com ratos, onde foi possível observar que não existem evidências laboratoriais de que a exposição a campos elétricos e magnéticos de 60 Hz causa diretamente câncer de qualquer natureza em animais. Entretanto, há indícios de que o campo magnético pode atuar como co-promotor de câncer em animais. No experimento desenvolvido, os animais que tiveram a aplicação da droga DMBA juntamente com a incidência de campo magnético de 0,5 T desenvolveram tumores.

2.2 Normas de segurança à exposição humana

A Lei nº 11.934 de 5 de maio de 2009 [3] dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, associados ao funcionamento de estações transmissoras de radiocomunicação, de terminais de usuários e de sistemas de energia elétrica nas faixas de frequência até 300 GHz, visando garantir a proteção da saúde e do meio ambiente.

É estabelecido pela Lei supracitada que para garantir a proteção da saúde e do meio ambiente em todo o território brasileiro, serão adotados os limites recomendados pela OMS para a exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos e magnéticos gerados por sistemas de energia elétrica. Enquanto não forem estabelecidas novas recomendações pela OMS, serão adotados os limites da ICNIRP, recomendados atualmente pela OMS.

Cabe ao órgão regulador federal de serviços de energia elétrica editar regulamentação sobre os métodos de avaliação e os procedimentos necessários para verificação do nível de campo elétrico e magnético, além de solicitar medição ou verificação, por meio de relatórios de cálculos efetuados com metodologia consagrada e

verificação de conformidade para a operação de novo sistema de transmissão de energia elétrica.

É estabelecido pela ICNIRP [16] que a população ocupacional exposta é definida por adultos que estão cientes do risco potencial a que estão expostos e das precauções necessárias. Em contraste, o público geral compreende indivíduos de todas as idades e em diferentes condições de saúde, podendo incluir grupos ou indivíduos particularmente suscetíveis. Na maioria das vezes, o público em geral desconhece sua exposição a campos ELF e, conseqüentemente, não toma precauções para evitar ou minimizar sua exposição. Por estas razões, os limites para a população em geral é mais restrigente em relação à população ocupacional.

Não existe informação suficiente sobre os efeitos biológicos e sobre a saúde da exposição a campos ELF da população humana ou em experiência com animais que proporcionem uma base rigorosa para estabelecer fatores de segurança. Para os campos ELF, a restrição básica é dada pela densidade de corrente induzida com o objetivo de prevenir efeitos sobre as funções do sistema nervoso.

Para campos ELF, a indução de uma densidade de corrente de 100 mA/m² atinge o limiar para provocar mudanças agudas na excitabilidade do sistema nervoso central, como a diminuição da percepção visual. Levando em conta o limiar acima exposto, é determinado que para esta faixa de frequência a população ocupacional deve ter sua exposição limitada a campos que induzam correntes de no máximo 10 mA/m², i.e., usar um fator de segurança de 10. Para a população em geral, um fator adicional de 5 é aplicado, sendo restringido a um nível de correntes induzidas de 2 mA/m². As restrições menores para o público em geral se devem ao fato de que a idade e o estado de saúde podem diferir daqueles da população ocupacional [16].

2.2.1 Níveis de referência

Os níveis de referência são definidos a partir das restrições básicas (limites de correntes induzidas) por modelos matemáticos e da extrapolação de resultados obtidos em investigações em laboratório.

Dosimetria é a ciência de quantificação dos EMF em tecidos e órgãos de corpos biológicos [18], sendo desenvolvidos vários métodos computacionais e de medição para determinar as intensidades de campo. Em muitos modelos utilizados não são levados em consideração fenômenos como a não homogeneidade e a anisotropia da condutividade elétrica, além de outras características dos tecidos para estes cálculos.

Em razão da dificuldade de realização de medidas diretas das restrições básicas, torna-se importante o desenvolvimento de modelos sofisticados do corpo humano visando o estudo em alta e baixa frequência, como os apresentados em [19], que leva em consideração mudanças tanto da permissividade como da condutividade de tecido para tecido com elevado grau de detalhamento de suas geometrias.

A Tabela 2.2 e a Tabela 2.3 apresentam os níveis limites para a exposição humana para os campos ELF devido às restrições básicas, segundo a ICNIRP [16].

Tabela 2.2 - Níveis de referência para população ocupacional exposta a campos elétricos e magnéticos variantes no tempo (em valores RMS não perturbados e frequência f em Hertz).

Faixa de Frequência	Campo Elétrico (V/m)	Campo Magnético (A/m)	Indução Magnética (μ T)
Até 1 Hz	-	$1,63 \times 10^5$	2×10^5
1 a 8 Hz	20.000	$1,63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$
8 a 25 Hz	20.000	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^4/f$
25 a 820 Hz	$500/f$	$20/f$	$25/f$

Tabela 2.3 - Níveis de referência para população geral exposta a campos elétricos e magnéticos variantes no tempo (valores RMS não perturbados e f em Hertz).

Faixa de Frequência	Campo Elétrico (V/m)	Campo Magnético (A/m)	Indução Magnética (μ T)
Até 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4
1 a 8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$
8 a 25 Hz	10.000	$4000/f$	$5000/f$
25 a 820 Hz	$250/f$	$4/f$	$5/f$

Desta forma são obtidos os valores limites de exposição para 50 e 60 Hz, segundo a Tabela 2.4 e a Tabela 2.5.

Tabela 2.4 - Limites de exposição para 50 Hz.

Público	Campo Elétrico (V/m)	Campo Magnético (A/m)	Indução Magnética (μ T)
Ocupacional	10.000	400	500
Geral	5.000	80	100

Tabela 2.5 - Limites de exposição para 60 Hz.

Público	Campo Elétrico (V/m)	Campo Magnético (A/m)	Indução Magnética (μ T)
Ocupacional	8.333	333	416
Geral	4.166	66	83

A Figura 2.1 apresenta os limites de referência do campo elétrico.

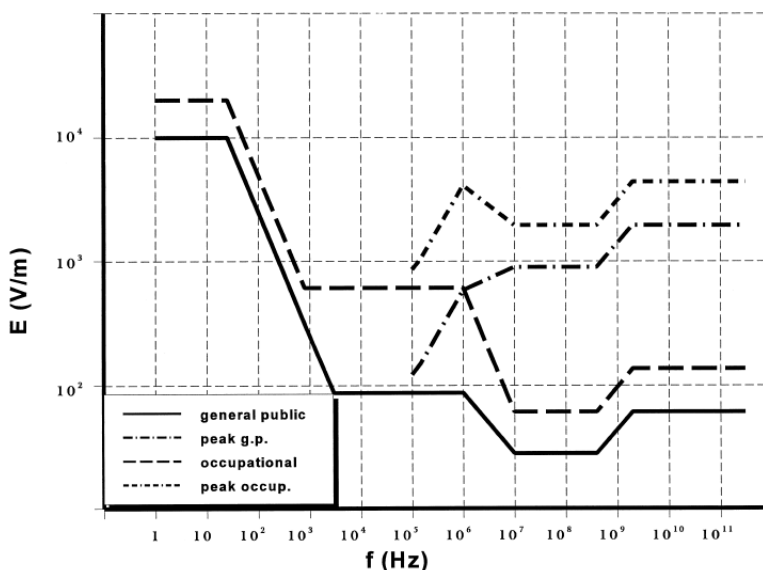


Figura 2.1 - Níveis de referência para a exposição a campos elétricos.

A Figura 2.2 apresenta os limites de referência da indução magnética.

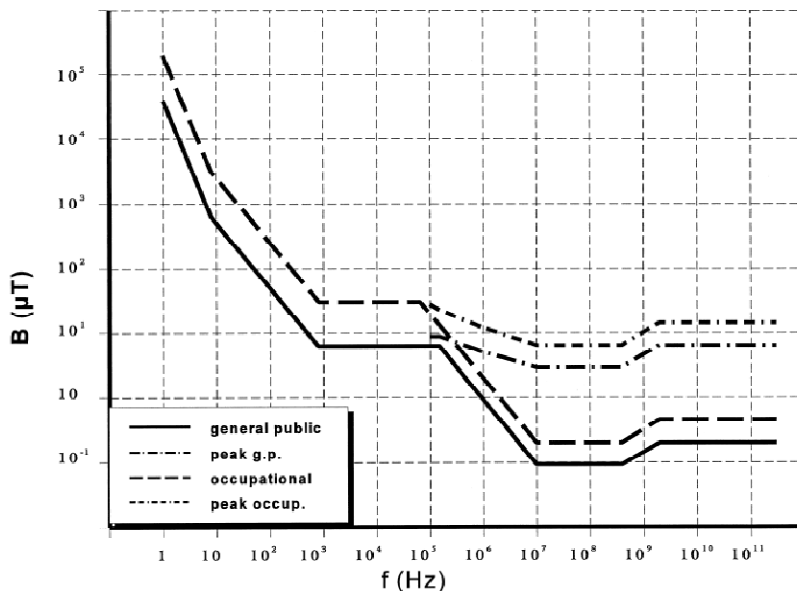


Figura 2.2 - Níveis de referência para a exposição a campos magnéticos.

O IEEE também estabelece padrões de segurança para a exposição para a exposição a campos ELF [20] tendo em vista a proteção dos públicos ocupacional e geral. Seus limites são determinados de forma diferente dos da ICNIRP, pois os níveis de campo elétrico e magnéticos são estabelecidos para os diferentes tecidos do corpo humano quando este é exposto. Apesar desta metodologia não servir de referência para a legislação nacional, o documento estabelece que [21] e [22] são referências para os métodos de medição de campos em baixa frequência.

A ABNT é outra organização que estabelece norma para a exposição de campos elétricos e magnéticos em ELF em [23], seguindo as recomendações da ICNIRP.

3 TEORIA ELETROMAGNÉTICA E O CÁLCULO ANALÍTICO DE CAMPOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

O caráter vetorial dos campos elétricos e magnéticos tem de ser levado em consideração na realização de medições e cálculos a seu respeito. Estes campos são representados por vetores, que possuem magnitude e direção.

Os princípios mais fundamentais do eletromagnetismo afirmam que cada carga individual cria um campo elétrico, de forma tal que as linhas de campo saem das cargas positivas e chegam às negativas, sendo este campo capaz de gerar forças sobre as cargas elétricas sob sua influência. Pode-se ainda afirmar que o campo elétrico local (em um determinado ponto) é dado pela soma vetorial dos campos elétricos gerados por todas as cargas existentes.

Por sua vez, o campo magnético é gerado por cargas elétricas em movimento e sua direção é perpendicular à direção do movimento. A indução remanente de materiais magneticamente duros também são fontes de campo magnético, sendo possível para efeitos de cálculo a substituição desta fonte por uma corrente que gere um campo equivalente. O campo magnético local é a soma vetorial de suas diversas componentes [24] [25].

Tanto o campo elétrico como o magnético são descritos pelas equações de Maxwell: a Lei de Gauss, a Lei de Faraday, a Lei de Ampère e a Lei de Gauss do magnetismo. Em baixas frequências, a corrente de deslocamento pode ser negligenciada, em razão de nestas condições a corrente de deslocamento ser pequena e a energia armazenada no campo também o ser. As equações de Maxwell na forma local e integral são dadas respectivamente por [25] [26]:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (3.1)$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho \cdot dv \quad (3.2)$$

onde \vec{D} (C/m²) é a densidade de fluxo elétrico, $d\vec{s}$ é o diferencial de superfície, S é a superfície de integração, ρ (C/m³) é a densidade de carga volumétrica, dv é o diferencial de volume, e V é o volume de integração limitado pela superfície S .

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (3.3)$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3.4)$$

onde \vec{E} (V/m) é o campo elétrico, $d\vec{l}$ é o diferencial de linha, C é o caminho fechado de integração, \vec{B} (T) é a densidade de fluxo magnético e dt é o diferencial de tempo.

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (3.5)$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{s} + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s} \quad (3.6)$$

onde \vec{H} (A/m) é o campo magnético e \vec{j} (A/m²) é a densidade superficial de corrente.

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (3.7)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (3.8)$$

A conexão entre as diferentes definições é realizada pelas equações constitutivas, que estabelecem as características dos campos em um determinado meio. Estas equações são:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.9)$$

onde ε (F/m) é a permissividade do meio.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.10)$$

onde μ (H/m) é a permeabilidade do meio.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.11)$$

onde σ (S/m) é a condutividade do meio.

3.1 Cálculo analítico de campos magnéticos em LT

É possível determinar o campo magnético em torno de um fio analiticamente a partir da equação $\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$, conhecida como lei de Ampère. Outra forma de escrever esta equação é $\oint_{L(S)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$, que demonstra que a circulação do campo magnético ao longo de uma linha que delimita uma determinada área é igual à corrente que atravessa esta superfície.

Para o caso de um domínio de cálculo homogêneo, com permeabilidade constante, as linhas de campo magnético são concêntricas ao fio. Logo, a equação de Ampère na forma integral pode ser escrita com: $H2\pi R = I$, onde R é a distância entre o fio e o ponto onde H é calculado. Logo:

$$H = I/2\pi R \quad (3.12)$$

Para a determinação dos campos em linhas de transmissão, pode-se utilizar uma formulação complexa, de forma a levar em consideração correntes e campos alternados, variantes no tempo [27]. Desta forma, valendo-se da relação constitutiva $\vec{B} = \mu\vec{H}$, pode-se escrever a indução magnética B como sendo:

$$\vec{B} = (B_{xr} + jB_{xi})\vec{i} + (B_{yr} + jB_{yi})\vec{j} \quad (3.13)$$

onde:

B_{xr} – Parte real do componente em x do fasor indução magnética;

B_{xi} – Parte imaginária da componente em x do fasor indução magnética;

B_{yr} – Parte real do componente em y do fasor indução magnética;

B_{yi} – Parte imaginária do componente em y do fasor indução magnética.

A Figura 3.1 ilustra graficamente como é realizada a soma dos componentes do vetor-fasor \vec{B} , que é dado pela soma das projeções dos fasores \dot{B}_x e \dot{B}_y nos eixos x e y , respectivamente. De acordo com a equação (3.13), $\dot{B}_x = B_{xr} + jB_{xi}$ e $\dot{B}_y = B_{yr} + jB_{yi}$.

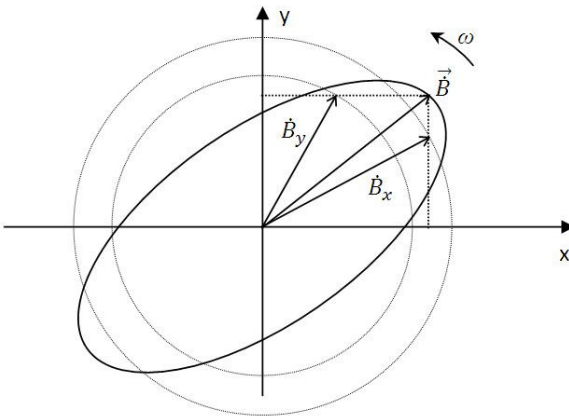


Figura 3.1 - Figura ilustrativa dos componentes do vetor-fasor.

A indução magnética gerada a uma distância R do condutor da linha, considerando um caso idealizado de um condutor retilíneo e infinito, percorrido por uma corrente \dot{I} (fasor) pode ser obtida por:

$$\dot{B} = \frac{\mu_0 \dot{I}}{2\pi R} \quad (3.14)$$

Para “ n ” condutores, a indução magnética resultante será o somatório das contribuições de cada condutor. As expressões para a indução magnética resultante nas direções horizontal e vertical são, então, dadas por:

$$\dot{B}_{xt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \left[\frac{y_i - y}{(x - x_i)^2 + (y_i - y)^2} \right] \quad (3.15)$$

$$\dot{B}_{yt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \left[\frac{x_i - x}{(x - x_i)^2 + (y_i - y)^2} \right] \quad (3.16)$$

onde:

\dot{B}_{xt} – Indução total na direção x gerada pelos n condutores;

\dot{B}_{yt} – Indução total na direção y gerada pelos n condutores;

\dot{I}_i – Corrente do condutor i ;

x, y – Coordenadas do ponto calculado;

x_i, y_i – Coordenadas do condutor i .

Se as correntes forem dadas em valores eficazes, a indução magnética resultante é dada em valores eficazes por:

$$B = \sqrt{|\dot{B}_{xt}|^2 + |\dot{B}_{yt}|^2} \quad (3.17)$$

3.1.1 Método de Carson

O Método das Imagens de Carson descreve uma formulação analítica para o cálculo do campo magnético sob linhas de transmissão em locais em que o solo possui uma baixa resistividade (menos de 100 $\Omega.m$), o que implica em uma distorção do campo em razão da presença do solo [8].

Este fenômeno possui relação com a profundidade de penetração do campo magnético, que é definida por:

$$\delta = \sqrt{2/\mu\sigma\omega} \quad (3.18)$$

onde ω é a pulsação em (rad/s).

É possível observar pela análise da equação (3.18) que a profundidade de penetração do campo magnético no solo diminui com o aumento da condutividade, da permeabilidade do solo e da frequência.

A formulação de Carson propõe a existência de condutores imagem que têm sua localização dependente da profundidade de penetração do campo (veja Figura 3.2). Abaixo são apresentadas as equações para o cálculo da indução magnética pelos condutores real e imagem na direção x .

$$\dot{B}_{x \text{ real}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \dot{i}_i \left[\frac{y_i - y}{(x - x_i)^2 + (y_i - y)^2} \right] \quad (3.19)$$

$$\dot{B}_{x \text{ imagem}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \dot{i}_i \left[\frac{\delta + y}{(x - x_i)^2 + (\delta + y)^2} \right] \quad (3.20)$$

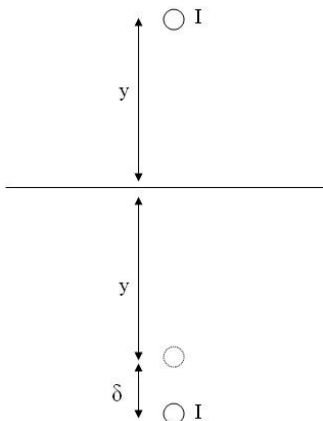


Figura 3.2 - Condutores real e imagem do Método de Carson

A indução magnética resultante na direção x é dada por:

$$\dot{B}_{xt} = \dot{B}_{x\text{ real}} + \dot{B}_{x\text{ imagem}} \quad (3.21)$$

Da mesma forma, para a direção y temos:

$$\dot{B}_{y\text{ real}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \left[\frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y_i - y)^2} \right] \quad (3.22)$$

$$\dot{B}_{y\text{ imagem}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \left[\frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (\delta + y)^2} \right] \quad (3.23)$$

A indução magnética resultante na direção y é dada por:

$$\dot{B}_{yt} = \dot{B}_{y\text{ real}} + \dot{B}_{y\text{ imagem}} \quad (3.24)$$

E assim como na equação (3.17), a indução magnética resultante é dada por:

$$B = \sqrt{|\dot{B}_{xt}|^2 + |\dot{B}_{yt}|^2} \quad (3.25)$$

3.2 Cálculo analítico de campos elétricos em LT

Assim como acontece com o campo magnético, o vetor campo elétrico gerado por linhas de transmissão apresenta rotação em praticamente todo o espaço envolvido [28]. Sendo a tensão senoidal da LT representada fasorialmente, o campo elétrico resultante é dado por:

$$\vec{E} = (E_{xr} + jE_{xi})\vec{i} + (E_{yr} + jE_{yi})\vec{j} \quad (3.26)$$

onde:

E_{xr} – Parte real do componente em x do fasor campo elétrico;

E_{xi} – Parte imaginária do componente em x do fasor campo elétrico;

E_{yr} – Parte real da componente em y do fasor campo elétrico;

E_{yi} – Parcela imaginária do componente em y do fasor campo elétrico.

O cálculo do campo elétrico gerado por LT's através da carga imagem consiste basicamente de duas etapas:

1. Cálculo da carga equivalente por unidade de comprimento do condutor;
2. Cálculo do campo elétrico produzido por estas cargas.

Para o caso do cálculo do campo elétrico em duas dimensões são utilizadas algumas simplificações

- As cargas são uniformemente distribuídas no cabo;
- A superfície do solo é plana e equipotencial;
- As torres não distorcem o campo elétrico.

Para que as cargas sejam determinadas, o potencial entre as fases e o terra podem ser representados como cargas equivalentes distribuídas uniformemente nos condutores das fases [29]. Para converter os potenciais em cargas, deve-se aplicar o método das imagens para calcular as capacitâncias próprias e mútuas da linha.

A Figura 3.3 ilustra um sistema de cargas imagem. O solo é considerado um condutor elétrico ideal, ou seja, tem condutividade elétrica infinita. Os condutores de transmissão aérea se encontram a uma

altura h do solo e isolados deste. Se o condutor possui uma carga q , há no solo uma carga $-q$ distribuída. A carga $-q$, no solo, pode ser concentrada num condutor cilíndrico a uma altura $-h$ da superfície do solo. Este condutor é uma imagem especular do condutor aéreo em relação ao solo.

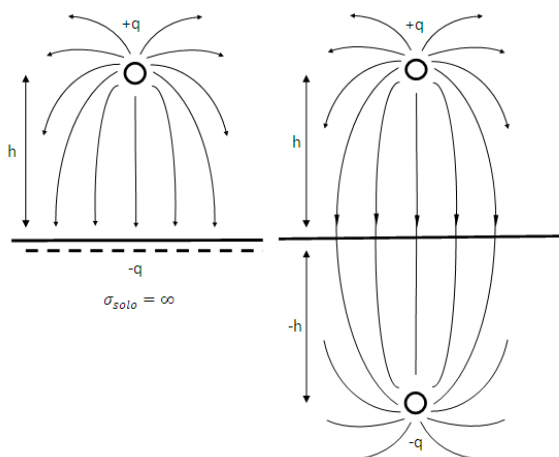


Figura 3.3 - Sistema de cargas equivalentes.

Com os condutores das fases e suas imagens é possível calcular as capacitâncias próprias e mútuas da linha. Para isto, é necessário calcular os coeficientes de potencial, reuni-los matricialmente e depois inverter esta matriz. A seguir será apresentada a formulação matemática para o cálculo das cargas equivalentes de cada condutor das fases e cabos para-raios.

As cargas do condutor de uma linha com múltiplos condutores podem ser representadas pela seguinte equação matricial [5]:

$$[\dot{Q}] = [C][\dot{V}] \quad (3.27)$$

onde:

$$[\dot{Q}] = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix}, \text{ matriz das cargas complexas [C/m];}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdot & C_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & \cdot & C_{nn} \end{bmatrix}, \text{ matriz das capacitâncias de linha [F/m];}$$

$$[\dot{V}] = \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix}, \text{ matriz das tensões de fase da linha [V];}$$

onde n é o número de cabos.

Para determinar a matriz $[C]$ é necessário calcular os coeficientes de potencial da linha pelas expressões abaixo, utilizando-se dos parâmetros geométricos mostrados na Figura 3.4 [5]:

$$\gamma_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad (3.28)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D'_{ij}}{D_{ij}}\right) \quad (3.29)$$

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ji} \quad (3.30)$$

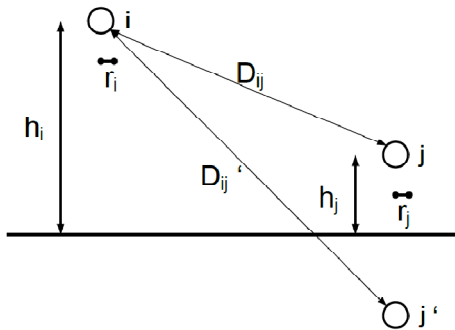


Figura 3.4 - Ilustração para o cálculo dos coeficientes de potencial [30].

onde:

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

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

h_i – Altura do condutor [m];

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

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

r_i – Raio do condutor i [m].

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

Invertendo a matriz $[\gamma]$, obtém-se a matriz $[C]$ que possibilita o cálculo das cargas equivalentes, que por sua vez possibilitam calcular o campo elétrico utilizando a expressão para um condutor retilíneo e infinito.

Quando as fases de uma LT possuem condutores com múltiplos subcondutores dispostos uniformemente sobre um círculo de raio R , como mostrado na Figura 3.5, r_{eq} pode ser interpretado como o raio de um condutor cilíndrico fictício que, possuindo a mesma carga \hat{q} , produz o mesmo campo elétrico que o condutor múltiplo [31].

$$r_{eq} = \sqrt[m]{mrR^{m-1}} \quad (3.31)$$

onde:

m – número de subcondutores;

r – raio do subcondutor;

R – raio geométrico do feixe.

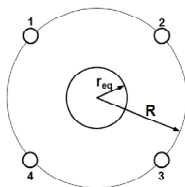


Figura 3.5 - Raio equivalente de um feixe geminado [30].

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

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

$$\dot{E}_{xt} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \left[\frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \quad (3.32)$$

e

$$\dot{E}_{yt} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \left[\frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{y + y_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \quad (3.33)$$

onde:

\dot{E}_{xt} – Campo elétrico total na direção x gerada pelos n condutores;

\dot{E}_{yt} – Campo elétrico total na direção y gerada pelos n condutores;

\dot{q}_i – Carga do condutor i ;

x, y – Coordenadas do ponto calculado;

x_i, y_i – Coordenadas do condutor i .

Se as tensões forem dadas em valores eficazes, o campo elétrico eficaz resultante é então dado por:

$$E = \sqrt{|\dot{E}_{xt}|^2 + |\dot{E}_{yt}|^2} \quad (3.34)$$

A Figura 3.6 apresenta as equipotenciais do campo elétrico, diversos loci do vetor campo elétrico e a intensidade do campo elétrico vertical a 1 e 3 m de altura do solo para uma LT de 765kV em estudo

apresentado em [28]. É interessante observar o comportamento do loci e o formato de suas elipses na distribuição espacial, melhor elucidando o que está escrito nas equações.

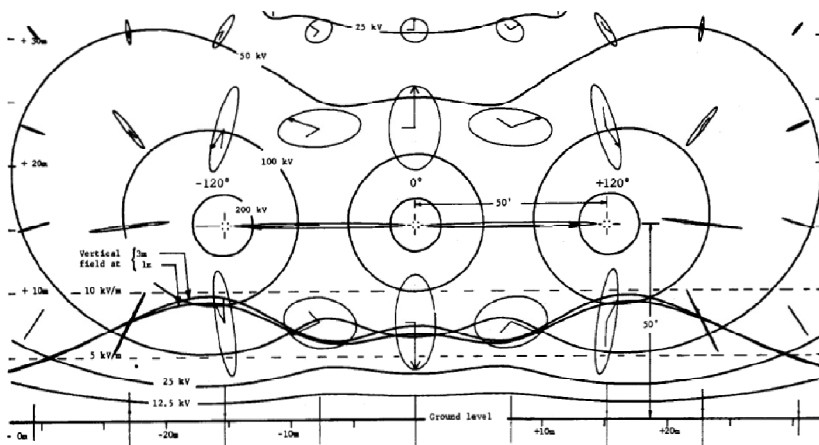


Figura 3.6 - Equipotenciais, os loci e a intensidade vertical do campo elétrico em uma LT de circuito horizontal simples de 765 kV [28].

4 MODELAGEM NUMÉRICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM REGIME HARMÔNICO

Neste capítulo são apresentadas as equações de Maxwell e as leis constitutivas na forma complexa (regime harmônico). A forma complexa das equações de Maxwell assume que a variação temporal de todas as grandezas físicas é sinusoidal com uma dada frequência [32]. Além disso, apresentam-se as condições de contorno homogêneas. Com essas equações, são deduzidas as formulações fortes do campo elétrico e do campo magnético. Em seguida, apresenta-se o conceito de discretização pelo método de elementos finitos. Por fim, deduzem-se as formulações fracas do campo elétrico e do campo magnético.

4.1 Equações de Maxwell e Leis de comportamento em regime harmônico

As equações de Maxwell apresentadas no Capítulo 3 em regime harmônico são as seguintes [32]:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (4.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (4.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + j\omega \vec{D} \quad (4.3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4.4)$$

onde $j \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{-1}$. A densidade de corrente de condução \vec{J} é dividida em duas parcelas: $\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_i$, onde \vec{J}_s é a densidade de corrente devido às fontes de corrente, e \vec{J}_i é a densidade de corrente devido às correntes induzidas em materiais condutores.

Aplicando-se o operador *div* em ambos os lados da equação (4.3), obtém-se a equação da continuidade de corrente em regime harmônico:

$$\operatorname{div}(\vec{J} + j \omega \vec{D}) = 0 \quad (4.5)$$

As leis de comportamento também apresentadas no Capítulo 3 em regime harmônico são:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (4.7)$$

$$\vec{J}_i = \sigma \vec{E} \quad (4.8)$$

Em certos casos μ , ε e σ tem um caráter tensorial e seus valores não são constantes.

4.2 Condições de contorno homogêneas

Condições de contorno adequadas devem ser aplicadas sobre a fronteira do domínio de estudo Ω para assegurar a unicidade da solução. Elas podem ser, conforme o problema considerado, relativas aos componentes tangencias de \vec{E} e \vec{H} , e aos componentes normais de \vec{D} , \vec{J} e \vec{B} .

Na fronteira Γ do domínio global Ω (ver Figura 4.1), considera-se algumas condições de contorno ditas condições homogêneas.

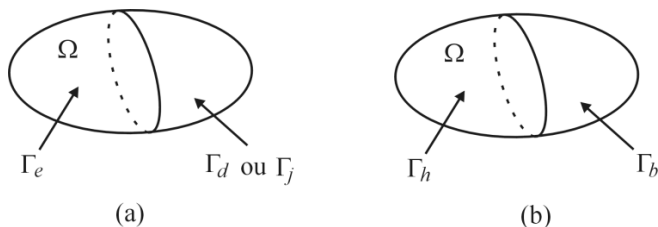


Figura 4.1 – Grandezas do domínio estudado: (a) elétricas e (b) magnéticas [32].

Para as grandezas elétricas, sobre as partes complementares das superfícies Γ_e e Γ_d (ou Γ_j) de Γ , eventualmente não conexas, definem-se as seguintes condições [32]:

$$\vec{n} \times \vec{E}|_{\Gamma_e} = 0 \quad (4.9)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{D}|_{\Gamma_d} = 0 \quad (4.10)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{J}|_{\Gamma_j} = 0 \quad (4.11)$$

onde \vec{n} é o vetor normal a superfície de fronteira Γ .

Para as grandezas magnéticas, sobre as partes complementares das superfícies Γ_h e Γ_b de Γ , eventualmente não conexas, definem-se as condições [32]:

$$\vec{n} \times \vec{H}|_{\Gamma_h} = 0 \quad (4.12)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{B}|_{\Gamma_b} = 0 \quad (4.13)$$

Essas condições de contorno homogêneas sobre os campos ocorrem por razões:

- a) físicas: condições no infinito, ou associadas aos materiais idealizados. Por exemplo, as equações (4.9) e (4.12), respectivamente, para os materiais condutores perfeitos e magnéticos perfeitos, ou seja, de condutividade e permeabilidade infinitas;
- b) simetria: quando se fixa a direção dos campos.

4.3 Formulação forte do campo magnético

Neste item é apresentada a formulação forte do campo magnético em regime harmônico. Esta formulação considera as correntes induzidas nas regiões condutoras (correntes de Foucault) e também pode considerar os efeitos peliculares e os efeitos de proximidade nas regiões condutoras. As restrições de sua aplicação são: a) todos os materiais do domínio de estudo são lineares e b) todas as fontes de campo são sinusoidais.

O modelo dessa formulação aplicado ao domínio Ω , de fronteira Γ , é caracterizado pelas seguintes equações diferenciais, lei de comportamento e condições de contorno:

$$\text{rot } \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (4.14)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_i \quad (4.15)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (4.16)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.17)$$

$$\vec{J}_i = \sigma \vec{E} \quad (4.18)$$

$$\vec{n} \times \vec{H}|_{\Gamma_h} = 0 \quad (4.19)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{B}|_{\Gamma_b} = 0 \quad (4.20)$$

ou

$$\vec{n} \cdot \vec{J}|_{\Gamma_h} = 0 \quad (4.21)$$

$$\vec{n} \times \vec{E}|_{\Gamma_b} = 0 \quad (4.22)$$

sendo

$$\Gamma = \Gamma_h \cup \Gamma_b \quad (4.23)$$

onde \vec{n} é o vetor normal a superfície de fronteira Γ .

Observe que nesse caso, considerou-se a densidade da corrente \vec{J} muito maior que a densidade de corrente de deslocamento $j\omega\vec{D}$.

A partir da equação (4.16) e (4.14), podem-se introduzir o potencial vetor magnético \vec{A} e o potencial elétrico V , tal que:

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (4.24)$$

$$\vec{E} = -\text{grad} V - j\omega\vec{A} \quad (4.25)$$

Aplicando (4.24) em (4.17), (4.25) em (4.18), e, em seguida, substituindo em (4.15), obtém-se:

$$\text{rot}(\mu^{-1}\text{rot}\vec{A}) + \sigma(\text{grad} V + j\omega\vec{A}) = \vec{J}_s \quad (4.26)$$

As condições de contorno para esse problema são dadas por:

$$\vec{n} \times \mu^{-1}\text{rot}\vec{A}|_{\Gamma_h} = 0 \quad (4.27)$$

$$\vec{n} \cdot \text{rot}\vec{A}|_{\Gamma_b} = 0 \quad (4.28)$$

ou

$$\vec{n} \cdot \sigma(\text{grad} V + j\omega\vec{A})|_{\Gamma_h} = 0 \quad (4.29)$$

$$\vec{n} \times (\text{grad} V + j\omega\vec{A})|_{\Gamma_b} = 0 \quad (4.30)$$

A equação (4.26) é válida para três dimensões (3D). Um inconveniente desta formulação é o caráter vetorial da incógnita que conduz a uma resolução numérica mais lenta. Devem-se determinar três incógnitas em cada ponto, os componentes do potencial vetor \vec{A} . Nos problemas 3D, isso conduz a sistemas lineares muito grandes e então, a um maior tempo de processamento.

Outro inconveniente é que essa formulação necessita de impor condições suplementares para assegurar a unicidade da solução, as quais são chamadas condições de calibre [32].

Todavia, quando a peça estudada é suficientemente longa, a análise pode ser conduzida sobre um corte que reconduz a um problema bi-dimensional (2D). Se as correntes de excitação que criam o campo

magnético são ortogonais ao plano de estudo, o potencial vetor só tem um componente dirigido segundo a direção dessas correntes, nesse texto considerado a direção z . Em 2D, a equação (4.26) se torna [32]:

$$\operatorname{div}(\mu^{-1} \operatorname{grad} A) + \sigma \left(\frac{dV}{dz} + j\omega A \right) = -J_s \quad (4.31)$$

A equação (4.31) é conhecida como formulação forte do campo magnético em regime harmônico. Para o estudo realizado nessa dissertação, considera-se $dV/dz = 0$, e a equação (4.31) resulta em:

$$\operatorname{div}(\mu^{-1} \operatorname{grad} A) + j\sigma\omega A = -J_s \quad (4.32)$$

4.4 Formulação forte do campo elétrico

Neste item é apresentada a formulação forte do campo elétrico em regime harmônico. A aplicação da formulação do campo elétrico em regime harmônico permite o estudo do meio dielétrico submetido a campos elétricos sinusoidais (harmônicos) considerando as perdas dielétricas e/ou as perdas ôhmicas.

O modelo dessa formulação aplicado ao domínio Ω , de fronteira Γ , é caracterizado pelas seguintes equações diferenciais, lei de comportamento e condições de contorno:

$$\operatorname{div}(\vec{J} + j\omega\vec{D}) = 0 \quad (4.33)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad (4.34)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (4.35)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (4.36)$$

$$\vec{J}_i = \sigma \vec{E} \quad (4.37)$$

$$\vec{n} \times \vec{E} \Big|_{\Gamma_e} = 0 \quad (4.38)$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{J} + j\omega\vec{D}) \Big|_{\Gamma_d} = 0 \quad (4.39)$$

sendo

$$\Gamma = \Gamma_e \cup \Gamma_d \quad (4.40)$$

onde \vec{n} é o vetor normal a superfície de fronteira Γ .

A partir da equação (4.34), pode-se introduzir um potencial escalar elétrico V tal que

$$\vec{E} = -grad V \quad (4.41)$$

Note que o campo elétrico assim definido representa, pela equação (4.34), um campo admissível. Na relação acima, o potencial V não é único. Em efeito, considerando os potenciais V_1 e V_2 definidos tal que $V_1 = V_2 + k$, onde k é uma constante, eles conduzem ao mesmo valor do campo elétrico \vec{E} . Para haver a unicidade da solução é necessário impor uma restrição ou uma condição de calibre sobre V . Na prática, a unicidade da solução é geralmente obtida com a ajuda das condições de contorno. Substituindo (4.41) em (4.36) e (4.37), e, em seguida, em (4.33), obtém-se a equação:

$$div [-(\sigma + j\omega\varepsilon) gradV] = 0 \quad (4.42)$$

que deve ser resolvida em todo o domínio levando em conta as condições de contorno. Para esse caso, considerou-se $\vec{J}_s = 0$. A equação (4.42) é conhecida como formulação forte do campo elétrico em regime harmônico.

As condições de contorno para esse problema são dadas por:

$$\vec{n} \times gradV|_{\Gamma_e} = 0 \quad (4.43)$$

$$\vec{n} \cdot [(\sigma + j\omega\varepsilon) gradV]|_{\Gamma_d} = 0 \quad (4.44)$$

4.5 Discretização pelo método de elementos finitos

Nos parágrafos anteriores, apresentaram-se as formulações fortes do campo elétrico e do campo magnético em regime harmônico sob forma de equações diferenciais de derivadas parciais. Essas equações regem a distribuição dos campos vetoriais ou das funções escalares.

A resolução de tais equações nem sempre pode ser obtida analiticamente e a utilização de métodos numéricos torna-se necessária para se obter uma solução aproximada do problema. O papel dos métodos numéricos é de substituir a formulação contínua por uma formulação discreta.

Para discretizar as formulações apresentadas, conduzem-se as equações escritas de uma forma diferencial para uma forma integral, a qual se adapta melhor a discretização pelo método de elementos finitos. Este método consiste em realizar uma malha na estrutura estudada e interpolar as incógnitas sob os elementos dessa malha.

No método de elementos finitos, o domínio de estudo Ω é dado por um conjunto de elementos geométricos de forma simples. O resultado desse processo de discretização do espaço é chamado de malha. Um elemento finito é então definido por sua forma geométrica e as funções de base ou de aproximação que lhe são associadas.

Em geometria 3D, os elementos da malha podem ser tetraedros, hexaedros e prismas [32]. Em 2D, os elementos são triângulos e quadriláteros. Sobre cada elemento, as incógnitas do problema são discretizadas por uma combinação de funções de aproximação. Tal combinação pode ser feita sobre os nós, as arestas, as faces e o volume do elemento [32]. O uso dessas funções permite interpolar o valor da incógnita em todo ponto do domínio estudado.

A discretização da forma fraca implica em resolver um sistema de equações cujos graus de liberdade estão ligados ao número de nós e de arestas da malha. Para obter tal sistema, devem-se escolher tanto as funções testes quanto às incógnitas geradas pela malha. Escolhendo as funções teste como sendo iguais as funções de base ou de aproximação (nodais ou de aresta) tem-se o chamado Método de Galerkin, o qual é utilizado neste trabalho [33]. Sua aplicação à formulação fraca gera um

sistema de equações algébricas cuja resolução dá uma solução aproximada do problema inicial.

4.6 Formulação fraca do campo magnético

A forma fraca para o problema de campo magnético em regime harmônico pode ser obtida da seguinte forma. Primeiramente, define-se o resíduo:

$$R = \operatorname{div}(\mu^{-1} \operatorname{grad} A) + \sigma j \omega A + J_s \quad (4.45)$$

em cada subdomínio regular de Ω . Multiplica-se R por uma função escalar de teste A' , suficientemente regular. Aplicando-se a fórmula de Green do tipo $\operatorname{div} - \operatorname{grad}$ (4.46) a esse produto, tem-se a equação (4.47):

$$\int_{\Omega} \bar{u} \operatorname{grad} v \, d\Omega + \int_{\Omega} \operatorname{div} \bar{u} v \, d\Omega = \int_{\Gamma} v \bar{n} \cdot \bar{u} \, d\Gamma \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} A' \bar{n} \cdot \mu^{-1} \operatorname{grad} A \, d\Gamma - \int_{\Omega} \mu^{-1} \operatorname{grad} A \cdot \operatorname{grad} A' \, d\Omega \\ + \int_{\Omega} j \sigma \omega A A' \, d\Omega + \int_{\Omega} J_s A' \, d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (4.47)$$

onde: $A' \in F_h^0$.

$$F_h^0 = \{A' \in L^2(\Omega); \operatorname{grad} A' \in \bar{L}^2(\Omega), A'|_{\Gamma_h} = 0\} \quad (4.48)$$

O termo referente à condição de contorno pode ser reescrito como sendo:

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} A' \bar{n} \cdot \mu^{-1} \operatorname{grad} A \, d\Gamma = \int_{\Gamma_h} A' \bar{n} \cdot \mu^{-1} \operatorname{grad} A \, d\Gamma + \\ \int_{\Gamma_b} A' \bar{n} \cdot \mu^{-1} \operatorname{grad} A \, d\Gamma \end{aligned} \quad (4.49)$$

O primeiro termo do lado direito é zero por causa da equação (4.48) e o segundo termo do lado direito é zero devido à (4.28). Desse modo, a equação (4.47) pode ser reescrita como sendo:

$$\begin{aligned}
 - \int_{\Omega} \mu^{-1} \text{grad } A \cdot \text{grad } A' d\Omega + \int_{\Omega} j\sigma\omega A A' d\Omega \\
 + \int_{\Omega} J_s A' d\Omega = 0
 \end{aligned} \tag{4.50}$$

A equação (4.50) na forma matricial é representada por:

$$(\mathbf{SS} + \mathbf{D})\mathbf{A} = \mathbf{J} \tag{4.51}$$

onde:

\mathbf{SS} – matriz global de rigidez;

\mathbf{D} – matriz referente aos materiais condutores;

\mathbf{A} – matriz dos potenciais vetores magnéticos (incógnitas);

\mathbf{J} – matriz das fontes das densidades de corrente.

4.7 Formulação fraca do campo elétrico

A forma fraca para o problema de campo elétrico em regime harmônico pode ser obtida da seguinte forma. Primeiramente, define-se o resíduo:

$$R = \text{div}[-(\sigma + j\omega\varepsilon) \text{grad } V] \tag{4.52}$$

em cada subdomínio regular de Ω . Multiplica-se R por uma função escalar de teste V' , suficientemente regular. Aplicando-se a fórmula de Green do tipo $\text{div} - \text{grad}$ (4.46) a esse produto, tem-se a equação (4.53).

$$\int_{\Gamma} V' \vec{n} \cdot (\sigma + j\omega\varepsilon) \text{grad } V \, d\Gamma - \int_{\Omega} (\sigma + j\omega\varepsilon) \text{grad } V \cdot \text{grad } V' \, d\Omega = 0 \quad (4.53)$$

onde $V' \in F_e^0$.

$$F_e^0 = \{V' \in L^2(\Omega); \text{grad } V' \in \bar{L}^2(\Omega), V'|_{\Gamma_e} = 0\} \quad (4.54)$$

O termo referente à condição de contorno pode ser rescrito como sendo:

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} V' \vec{n} \cdot (\sigma + j\omega\varepsilon) \text{grad } V \, d\Gamma \\ = \int_{\Gamma_e} V' \vec{n} \cdot (\sigma + j\omega\varepsilon) \text{grad } V \, d\Gamma \\ + \int_{\Gamma_d} V' \vec{n} \cdot (\sigma + j\omega\varepsilon) \text{grad } V \, d\Gamma \end{aligned} \quad (4.55)$$

O primeiro termo do lado direito é zero por causa da equação (4.54) e o segundo termo do lado direito é zero devido à (4.44). Desse modo, a equação (4.55) pode ser reescrita como sendo:

$$\int_{\Omega} (\sigma + j\omega\varepsilon) \text{grad } V \cdot \text{grad } V' \, d\Omega = 0 \quad (4.56)$$

Usando o método dos resíduos ponderados juntamente com o método de Galerkin, obtém-se para o elemento de referência uma matriz elementar [34]. A montagem das matrizes elementares em uma matriz global requer que os termos desta matriz sejam montados em linhas e colunas correspondendo à numeração dos nós da malha global. A solução do sistema é realizada por uma técnica de resolução de sistema

linear (como eliminação de Gauss) após inserir as condições de contorno na matriz global.

A matriz global pode ser representada por:

$$\mathbf{SSV} = \mathbf{0} \quad (4.57)$$

onde:

\mathbf{SS} – matriz global de rigidez;

\mathbf{V} – matriz dos potenciais escalares elétricos (incógnitas);

$\mathbf{0}$ – matriz nula.

Neste capítulo apresentaram-se as formulações usadas neste trabalho, que estão implementadas no módulo EFCC do EFCAD para cálculo dos campos magnético e no GetDP para o cálculo dos campos elétricos. Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 6.

5 MEDIÇÃO DE CAMPOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Este capítulo apresenta as principais considerações deste trabalho de dissertação sobre os métodos de medição de campos elétricos e magnéticos. Além disso, são revisadas as normas estabelecidas pela ABNT [23] [35], que é reconhecida como único Foro Nacional de Normalização técnica no Brasil, que utiliza como referências normativas o IEEE [21] [22] [36], o IEC [37] e o CENELEC [38]. Também são expostos trabalhos científicos realizados sobre este assunto, procurando contextualizar este trabalho com o que tem sido desenvolvido na área.

5.1 Medição de campos magnéticos

Para a medição de campos magnéticos deve ser considerada a altura de 1 m em relação ao solo, devendo ser medido no sentido de maior intensidade do campo [21] [35]. O ideal é utilizar um medidor em 3 eixos, tornando possível a determinação do campo resultante, que é informação relevante em relação aos limites de exposição.

É interessante salientar que embora as normas de medição [21] [35] determinem que as medições devem ser feitas a 1m de altura do solo, a legislação estabelece que os níveis de referência são estabelecidos para uma altura de 1,5 do solo [4], tanto para o campo magnético como para o elétrico.

A medição das componentes horizontal e vertical do campo magnético pode ser executada com o objetivo de realizar comparações com cálculos [21].

A intensidade de campo magnético é medida orientando-se o sensor de forma perpendicular às linhas de campo. Nesta orientação, a bobina sensor (sonda) estará alinhada de forma tal que o máximo número possível de linhas de campo a atravesse, obtendo a intensidade máxima de campo no ponto.

Para a medição de campos magnéticos, o equipamento de medição pode ser segurado pelo operador. A natureza não magnética do

corpo humano é incapaz de perturbar o campo magnético e a operação do sensor. Entretanto, deve-se atentar para o deslocamento de automóveis próximos a linha de transmissão, caso esta esteja ao longo de uma avenida, rua ou estrada. Nesta situação, o campo é distorcido, sendo necessário esperar que o medidor volte a ter uma medição estável.

5.2 Medição de campos elétricos

O campo elétrico sob linhas de transmissão é medido tipicamente a 1 m sobre o nível do solo [21], embora a medição em outras alturas possa ser realizada quando for de interesse. O corpo de prova deve ser orientado de forma a medir o campo elétrico vertical (Figura 5.1), pois esta medida é normalmente utilizada para caracterizar os efeitos da indução em objetos próximos ao nível do solo.

A distância entre o medidor de campo elétrico e o operador do equipamento deve ser de pelo menos 2,5 m, o que garante um erro máximo de 3% [21]. Logo, a medição da intensidade de campo elétrico deve ser realizada com a ajuda de um tripé suportando o equipamento de medição – no caso, o HI-3604 –, como mostrado na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Medidor de campos HI-3604 montado sobre tripé conectado ao leitor remoto.

O operador deve realizar as medições por via do leitor remoto, cujo cabo de conexão não pode distorcer o campo a sua volta (o que aconteceria no caso de um par de fios metálicos). No medidor utilizado, os cabos são constituídos de fibra óptica.

A Figura 5.2 mostra como o campo elétrico é perturbado pelo corpo humano, sendo que concentrações dos campos sobre o corpo criam atenuações do mesmo em zonas adjacentes à pessoa presente no campo. Dependendo da distância a que o corpo se encontra, as perturbações causadas pelo corpo podem fazer com que os valores medidos sejam tanto aumentadas como diminuídas.

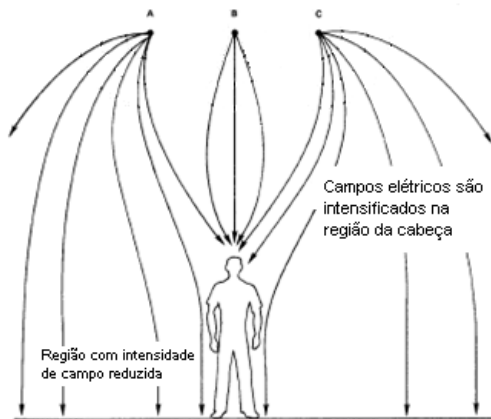


Figura 5.2 – Deformação do campo elétrico pelo corpo humano [39].

A Figura 5.3 apresenta curvas calculadas para um campo uniforme. Os pontos de medidas se referem a um observador em contato com o solo de 1,80 m de altura, embaixo de uma linha de transmissão. Os efeitos de proximidade são mostrados para o medidor de campo a 1,0, 1,4 e 1,6 m acima do plano de terra. O trabalho [40] apresenta um estudo aprofundado sobre os efeitos de proximidade de quem executa a medição.

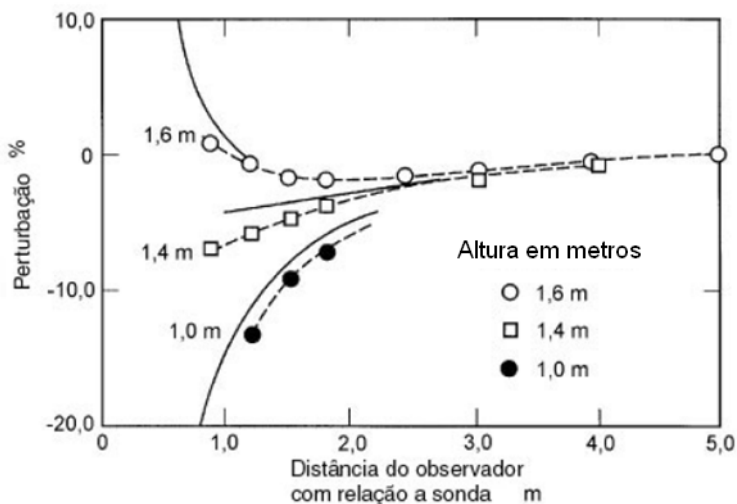


Figura 5.3 - Curvas da perturbação causada pela presença humana em um campo uniforme [35].

Se o objetivo é medir o campo não perturbado, o ideal é que a medição seja realizada em terreno plano e livre tanto quanto possível de objetos e pessoas ao redor. Deseja-se evitar a presença de outras linhas de potência, torres, árvores, cercas, vegetação alta e outras irregularidades. Vegetação isolada provoca o mesmo tipo de distúrbio provocado pelo corpo humano, sendo o grau de perturbação dependente da quantidade de água contida na vegetação – uma grande porcentagem de água torna os corpos bons condutores.

Também deve ser observada a presença de objetos não permanentes na área de medição, principalmente se forem feitos de materiais condutores (veículos, por exemplo). Se possível, evitar estes corpos em pelos menos três vezes sua maior dimensão [21]. Já a medição da perturbação causada por corpos permanentes deve ser realizada a um metro de distância. Construções em alvenaria também podem causar distorções significativas nos campos, uma vez que em sua estrutura existe material condutor (vigas, lajes, concreto armado) e que muitas vezes estão aterrados.

É ainda importante observar a interferência causada pelas assimetrias do equipamento de medição. Conforme demonstra a Figura 5.4 para o medidor HI-3604, a maior dimensão do instrumento deve estar alinhada com os condutores da linha de transmissão. Esta orientação é necessária para reduzir qualquer resposta que a assimetria do corpo possa causar na medição do campo horizontal.

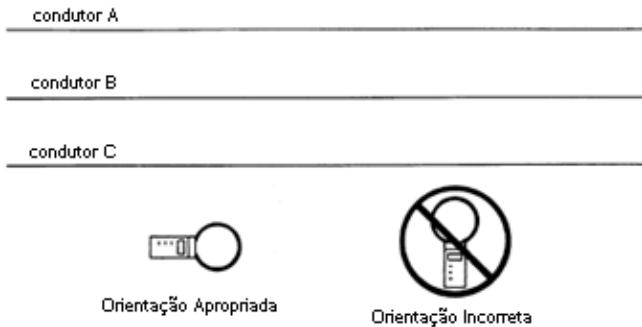


Figura 5.4 – Posição correta do medidor HI-3604 para medir campo elétrico em linha de transmissão.

A análise dos campos gerados por linhas de transmissão em vista da exposição humana acontece em sua grande maioria das vezes em ambiente urbano. Este ambiente cria dificuldades adicionais para que as medições sejam realizadas com qualidade. O primeiro ponto relevante é que muitas das medições precisam ser realizadas próximas a ruas e a avenidas, sendo o deslocamento de veículos um grande problema para a correta medição dos campos elétricos por provocarem distorções temporárias do campo. Outro fator relevante como fonte de erro é a superfície irregular das medições, possuindo calçadas e canteiros que dificultam a obtenção de nível de medição constante.

Em diversas ocasiões, a medição do perfil não pode ser realizada na extensão determinada por norma devido à existência de obstáculos físicos, que impossibilitam o acesso aos locais desejados.

5.3 O medidor de campos elétricos e magnéticos utilizado

O HI-3604 é um sistema de medição de campos elétricos e magnéticos para frequência de 50/60 Hz. Essa medição é mostrada através de um *display* digital, sendo possível ver a leitura das intensidades de campos elétricos ou magnéticos, que são escolhidos através de seleção por chave. Existem ainda as possibilidades de leitura remota através de controle remoto conectado através de fibra óptica ou a aquisição de dados para a memória (112 leituras) [39]. A Figura 5.5 mostra a foto da face frontal do medidor de campos HI-3604.

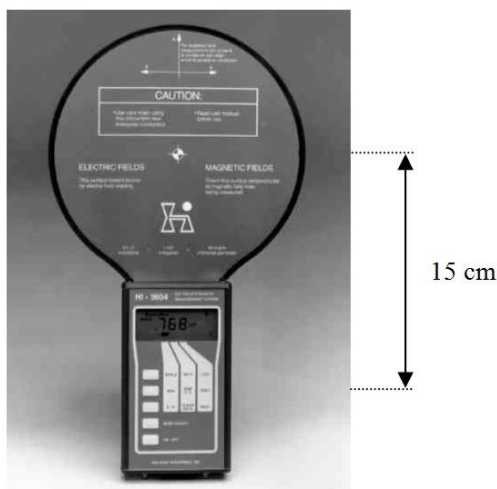


Figura 5.5 – Foto da face frontal do medidor de campos HI-3604 [39].

Os campos magnéticos são detectados por uma bobina formada por centenas de voltas de fio muito fino. Quando esta bobina é colocada em um campo magnético alternado, correntes são induzidas na bobina em proporção à intensidade do campo magnético aplicado. Como esta resposta é também diretamente proporcional à frequência, o medidor possui uma compensação eletrônica deste efeito, gerando uma resposta plana para a faixa de frequência de interesse [39].

Os campos elétricos são detectados pelo sensor de corrente de deslocamento que consiste de dois discos condutores eletricamente

conectados separados por uma fina película de material dielétrico. Quando imerso em um campo elétrico, as cargas se redistribuem entre os dois pratos paralelos de forma que o campo elétrico entre eles é nulo. Esta redistribuição de cargas pode ser medida e relacionada com a intensidade de campo elétrico externo [39].

A Figura 5.6 mostra uma representação do princípio construtivo dos sensores descritos nos parágrafos anteriores.

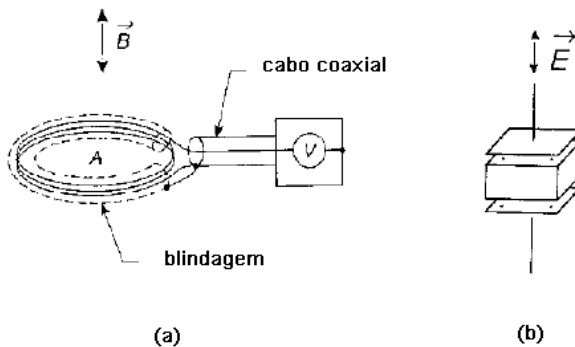


Figura 5.6 - Princípio construtivo dos sensores magnético (a) e elétrico (b) [36].

O HI-3604 possui como transdutor de campo magnético uma bobina eletricamente blindada de 16,5 cm de diâmetro e 400 espiras e, como transdutor de campo elétrico, um sensor de corrente de deslocamento de discos condutores concêntricos [39].

5.4 Medição de perfil lateral em linha de transmissão

Quanto ao método de medição, para a obtenção de um perfil lateral, indicado na Figura 5.7, devem ser tomadas medidas a 1 m de altura do solo na direção perpendicular aos condutores. As medições de perfil lateral (meio perfil) devem começar pelo ponto central da linha da área de interesse e se estender por pelo menos 30 m além do condutor mais externo. Para medições de perfil completo, deve-se começar pelo ponto de interesse de um lado da linha e realizar as medições até o lado

oposto. Ao menos 5 medições igualmente espaçadas devem ser feitas sob os fios [21]. É recomendável que seja traçada a curva durante a medição para que se possa verificar se os detalhes necessários foram obtidos. A hora em que são realizadas as medições deve ser anotada, se possível, várias vezes durante a medição. Este procedimento é válido tanto para o campo magnético como para o campo elétrico.

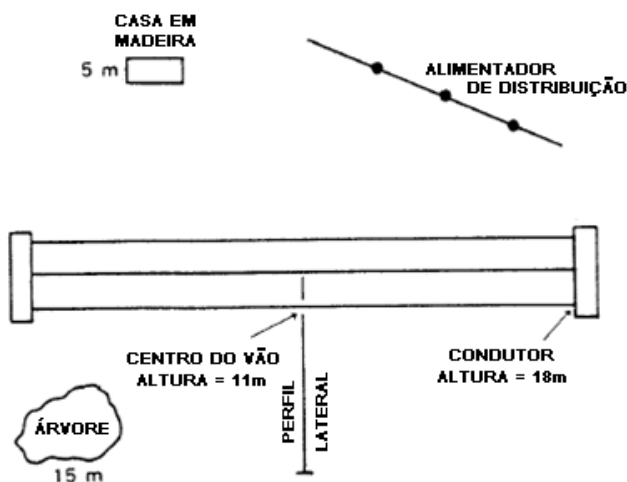


Figura 5.7 – Perfil lateral com a descrição de objetos relevantes no entorno com respectivas alturas.

5.5 Relatórios de medições de campos

Informações sobre as condições ambientais (i.e., temperatura, umidade, cobertura do solo), parâmetros da linha de transmissão (i.e., tensões, correntes, geometria dos condutores, pontos de medição), e a instrumentação devem ser relatadas. As informações a serem observadas devem estar de acordo com os objetivos da medição.

Um exemplo de folha de dados para medição é apresentado no Anexo 1.

5.6 Medição da resistividade de terra

O conhecimento da resistividade de terra é importante para a determinação dos campos magnéticos em cálculos analíticos – método de Carson – e numéricos, uma vez que o efeito do solo na distribuição espacial do campo pode ser de grande importância.

Existem basicamente duas formas de medir a resistividade do solo: medição por amostragem e medição local. A medição por amostragem ocorre em laboratório através de amostras de diversos tipos de solos retirados em campo. Neste tipo de medição, ocorrem incertezas devido ao tipo de ambiente em que se encontram as amostras de solo.

Entre os métodos de medição local, o método de Wenner é muito difundido como solução de engenharia. O método consiste em cravar quatro hastes em linha, igualmente espaçadas, no local onde se pretende medir a resistividade do solo [41].

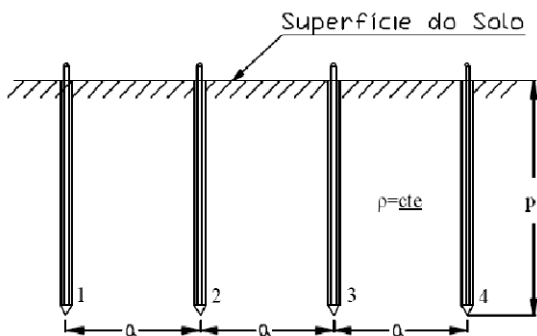


Figura 5.8 – Configuração das hastes no método de Wenner [42].

A Figura 5.8 mostra a configuração das hastes para a medição da resistividade de terra pelo método de Wenner, onde a é o espaço entre as hastes, P é a altura de cravação das hastes e ρ é a resistividade em solo homogêneo.

A medição consiste de injetar uma corrente I na haste 1 e coletá-la na haste 4. Esta corrente ao passar pelo solo produz uma diferença de potencial entre as hastes 2 e 3. Desta forma, é possível obter o valor da

resistência R do solo dividindo-se a diferença de potencial medida entre as hastes 2 e 3 pela corrente de teste I . Desta forma a resistividade do solo pode ser determinada por:

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad (5.1)$$

Em razão de o solo possuir características anisotrópicas, as medições devem ser feitas em várias direções, atribuindo-se o valor médio das resistividades calculadas para o solo analisado.

6 AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta uma avaliação dos resultados obtidos, realizando uma comparação entre as medições, as simulações e os cálculos analíticos. Procura-se ainda explicar sobre as técnicas utilizadas e de que forma elas impactam sobre os resultados.

6.1 Avaliação dos campos magnéticos

A linha de transmissão utilizada para estudo pertence à Eletrosul Centrais Elétricas S.A., ligando as subestações de Palhoça e Florianópolis. Sua tensão nominal é de 138 kV, possuindo uma configuração de duplo circuito vertical. A Tabela 6.1 apresenta as características da LT Palhoça-Florianópolis.

Tabela 6.1 - Características da linha de transmissão Palhoça - Florianópolis.

Condutor das fases	
Tipo	Hawk
Diâmetro	21,8 mm
Material	CAA
Distância entre fases	3,6 m (vertical)
Distância entre circuitos	6,5 m
Configuração de fases	RST // RST
Pára-Raios	
Tipo	OPWG
Diâmetro	3/8" (9,2 mm)

Neste item são apresentadas duas medições executadas no mesmo local, em um intervalo de 30 dias. O local escolhido situa-se na Avenida Central da cidade de Palhoça, próximo à subestação da Eletrosul. Este local foi escolhido devido à facilidade de acesso e por representar os locais de interesse quando se realiza medições dos campos emitidos com preocupação à exposição humana, ou seja, ambientes urbanos, com tráfego de veículos e pedestres. Esta escolha, todavia, traz dificuldades adicionais para a execução das medições.



Figura 6.1 - Local de medição na LT Palhoça - Florianópolis.

A Figura 6.1 apresenta a região onde as medições foram realizadas. A linha contínua representa o local onde passa a linha de transmissão e a linha tracejada o local onde foi medido o perfil da linha de transmissão.

O local onde foram realizadas as medições é o ponto em que os cabos se encontram mais próximos ao solo. Pode-se perceber através da Figura 6.1 que ao norte existe uma edificação que limita o espaço de medição, e que ao sul, na rua anexa à avenida principal, existe um alimentador que pode causar interferência nas medições. Situações como esta são inerentes ao ambiente urbano e, por esta razão, são avaliadas nas medições realizadas.

Com objetivo de avaliar a relevância da interferência do solo no campo medido, foi realizada ainda a medição da resistividade do solo. O instrumento utilizado é denominado Biddle Megger 250.220, e obteve-se a resistividade de $145 \Omega \cdot m$ para o local. A altura dos cabos no local foi definida por instrumento de ultrassom do fabricante Suparule,

Modelo 600. A altura medida para o cabo mais baixo foi de 9,75 m. A Figura 6.2 mostra a face frontal do equipamento de medição da altura dos cabos e a Figura 6.3 o equipamento de medição da resistividade de terra.



Figura 6.2 - Equipamento de medição da altura dos cabos.



Figura 6.3 - Equipamento de medição da resistividade de terra.

A primeira das duas medições de campos magnéticos aqui apresentados foi realizada no dia 26 de novembro de 2010, no período entre 09h00min e 09h30min e denominada de M01. O método aplicado segue as normas descritas no capítulo 5, onde a marcação da linha de medição no solo foi feita espaçada de metro em metro. O equipamento de medição do campo magnético foi suportado diretamente pelo operador a 1m de altura do solo. As medições foram tomadas com o medidor de campos Holaday HI-3604 posicionado no sentido vertical, de forma a medir o campo horizontal referenciado como de direção x, sendo este campo referido como Hx.

O resultado obtido é apresentado na Figura 6.4, cujos valores numéricos são apresentados no Anexo 2. A curva obtida é comparada com resultados analíticos e numéricos. Os resultados analíticos são obtidos através dos métodos descritos no capítulo 3 e os resultados numéricos são obtidos através do EFCAD, que em seu módulo EFCC utiliza as formulações do campo magnético em regime harmônico descritas no capítulo 4.

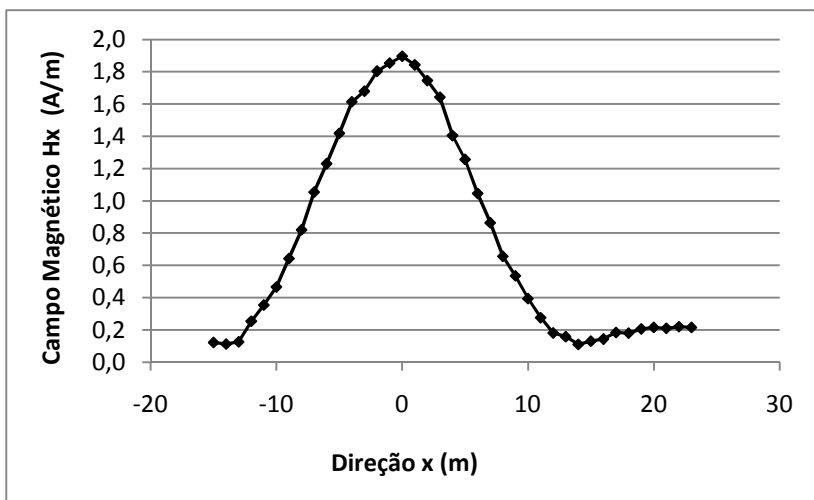


Figura 6.4 - Campo magnético medido em M01.

Para realizar esta comparação com os cálculos analíticos e numéricos se faz necessário conhecer as correntes em cada cabo de fase da linha de transmissão. Estes valores foram obtidos juntamente à Eletrosul, através de seu Departamento de Operação do Sistema (DOS), sendo apresentados os seus valores médios para o período de medição na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Dados utilizados para a simulação e cálculos analíticos de M01.

	Circuito 1	Circuito 2
Corrente Fase A	177 A	178 A
Corrente Fase B	174 A	182 A
Corrente Fase C	173 A	185 A

Para gerar os resultados analíticos foi elaborado um programa em MATLAB, cujo código é apresentado no Anexo 3. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.5, onde é mostrado o cálculo analítico sem levar em consideração o efeito do solo.

A Figura 6.6 apresenta a comparação entre o Método das Imagens de Carson e o cálculo que não leva em consideração a interferência do solo. Pode-se observar que para este caso as diferenças entre os resultados obtidos são pequenas. Mesmo assim é utilizado o Método de Carson para os resultados analíticos avaliados.

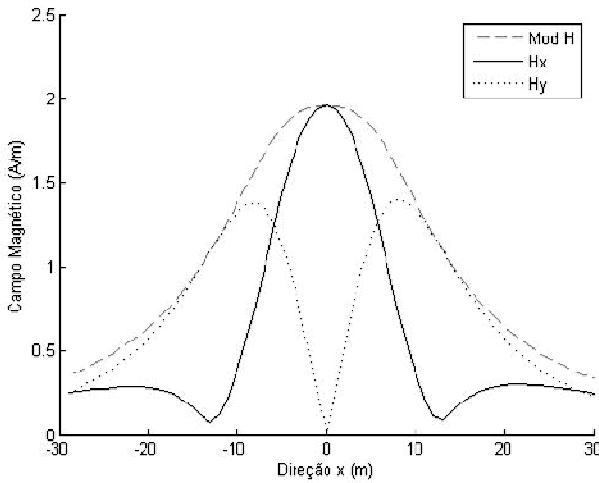


Figura 6.5 - Resultado analítico para o campo magnético.

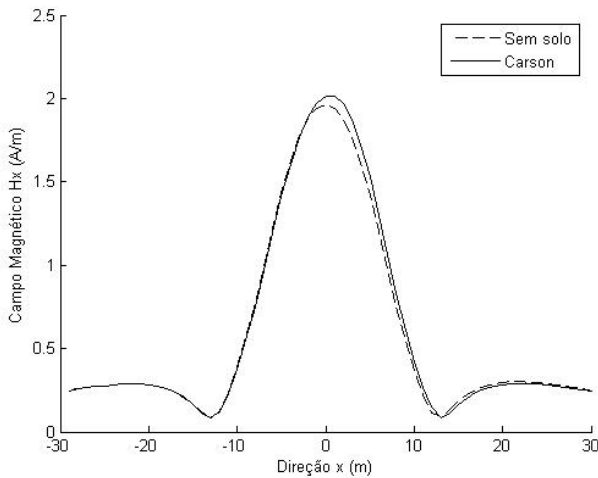


Figura 6.6 - Comparação entre os métodos analíticos para o campo magnético.

O módulo EFCC do EFCAD possui como dado de entrada a densidade de corrente, como se pode observar na Tabela 6.3. É importante salientar que a dimensão do condutor é aumentada em relação à realidade na simulação, de 21,8 mm para 50 mm de diâmetro. Isto se faz necessário devido à incapacidade do *software* de produzir uma malha para a geometria real, o que, porém não acarreta em erro significativo nos resultados obtidos para a linha de medição que fica a 1m de altura do solo. Todavia, há um erro considerável dos valores do campo magnético próximo aos cabos.

Tabela 6.3 - Dados utilizados para simulação de M01 no EFCAD.

	Circuito 1	Circuito 2
Densidade de corrente A	0,01621 A/mm ²	0,01675 A/mm ²
Densidade de corrente B	0,01588 A/mm ²	0,01675 A/mm ²
Densidade de corrente C	0,01608 A/mm ²	0,01675 A/mm ²
Raio do condutor	0,05 m	0,05 m
Seção do condutor	$7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	$7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

A Figura 6.7 apresenta o domínio de cálculo para a modelagem do campo magnético no EFCAD. Este domínio de cálculo consiste de 6 círculos que representam os cabos em corte, uma região de ar e uma região para o solo com sua condutividade definida em medição.

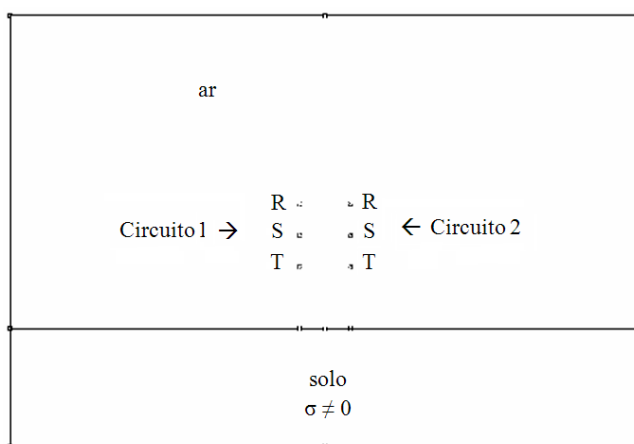


Figura 6.7 - Domínio de cálculo para a modelagem de campo magnético

A altura do cabo em relação ao solo é a definida pelos instrumentos de medição de altura utilizados e pela geometria da torre. É considerada na simulação uma espessura do solo de 15 m e uma altura da camada de ar de 40 m. É representada uma faixa lateral de 40 m para cada lado da LT. Essas medidas foram definidas após inúmeros testes (cerca de 10 desenhos diferentes) para avaliar os erros de truncamento que foram observados nos primeiros modelos com dimensões menores.

Para a simulação são consideradas condições de contorno de Dirichlet em todo o limite do domínio de cálculo. As correntes-fonte estão contidas nas regiões dos condutores, de acordo com a Tabela 6.3. A Figura 6.8 apresenta a malha 2D de elementos finitos gerada pelo EFCAD para o cálculo do campo magnético.

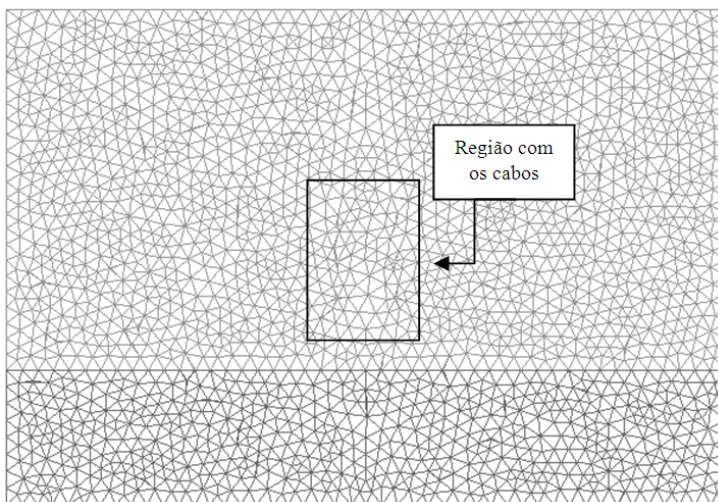


Figura 6.8 - Malha 2D do domínio de cálculo para a modelagem de campo magnético.

A Figura 6.9 apresenta as linhas de fluxo magnético obtidas no EFCAD. A área escurecida representa o solo.

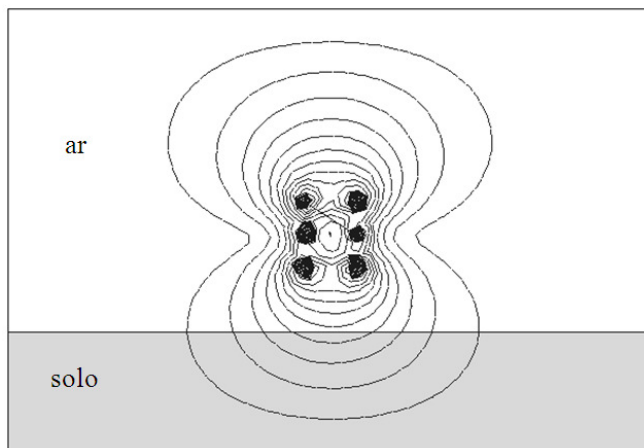


Figura 6.9 – Linhas de fluxo magnético da simulação no EFCAD para medição M01 considerando a condutividade do solo.

A Figura 6.10 apresenta a comparação entre os resultados analíticos, numéricos e medidos. Os resultados obtidos demonstram boa concordância entre si. É possível notar que a curva de medição é pouco suave em seu topo. Este erro é introduzido pela dificuldade de manter uma correta referência de posição em relação aos cabos da linha, consequência do canteiro central da avenida.

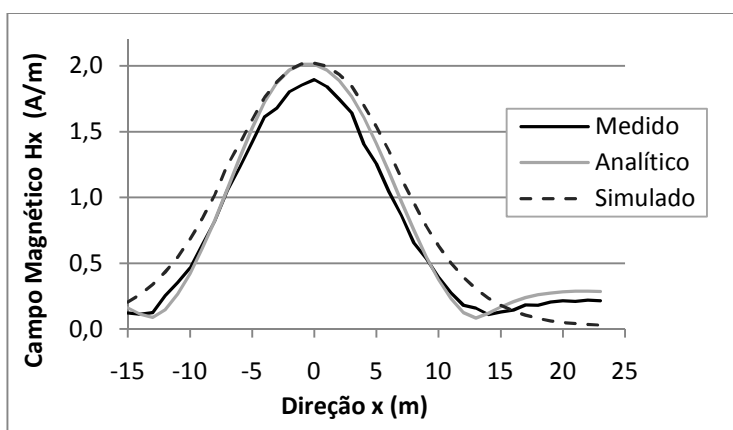


Figura 6.10 - Comparação entre os resultados analítico, numérico e medido para M01.

A Figura 6.11 apresenta o erro relativo dos valores medidos em relação aos valores analíticos. Apenas os valores medidos próximo ao eixo central da linha de transmissão são avaliados porque além dos limites estabelecidos os valores são muito pequenos, gerando erros grandes que não servem como referência para a avaliação dos resultados.

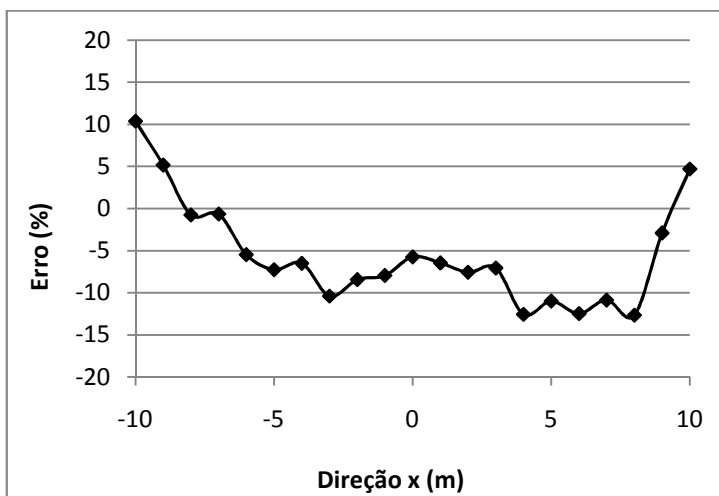


Figura 6.11 - Erro dos valores medidos em relação aos analíticos em M01.

A segunda medição foi realizada no dia 27 de dezembro de 2010, no mesmo local já descrito, entre as 15h15min e 15h30min, sendo denominada de medição M02. Foram empregadas as mesmas técnicas utilizadas na primeira medição, assim como as simulações e cálculos analíticos foram realizados de acordo com as mesmas considerações do primeiro caso. A curva obtida nesta medição é mostrada na Figura 6.12.

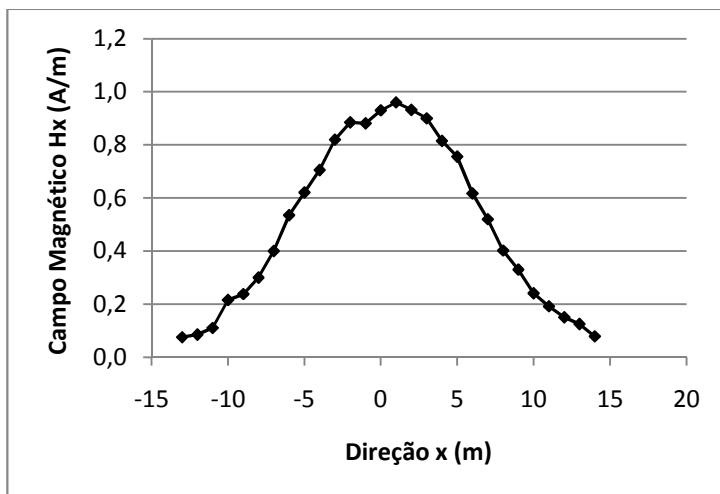


Figura 6.12 - Campo magnético medido em M02.

Os valores médios das correntes durante a medição do campo magnético são apresentados na Tabela 6.4, de acordo com o DOS da Eletrosul. Os valores de resistividade do solo são considerados os mesmo de M01.

Tabela 6.4 - Dados utilizados para a simulação realizada no EFCAD para M02.

	Circuito 1	Circuito 2
Corrente Fase A	83 A	83 A
Corrente Fase B	80 A	84 A
Corrente Fase C	79 A	84 A

A Figura 6.13 apresenta uma comparação entre os resultados analítico e numérico em relação à medição de campo magnético M02.

A Figura 6.14 apresenta o erro relativo entre a medição e os valores analíticos. Pode-se observar que no ponto $x = -10$ há uma inconsistência na medição. Isto ocorreu devido ao fato de este ponto ser medido em desnível em relação aos pontos avaliados mais próximos ao centro da LT, demarcando o início da calçada localizada ao norte da linha de transmissão (ver Figura 6.1).

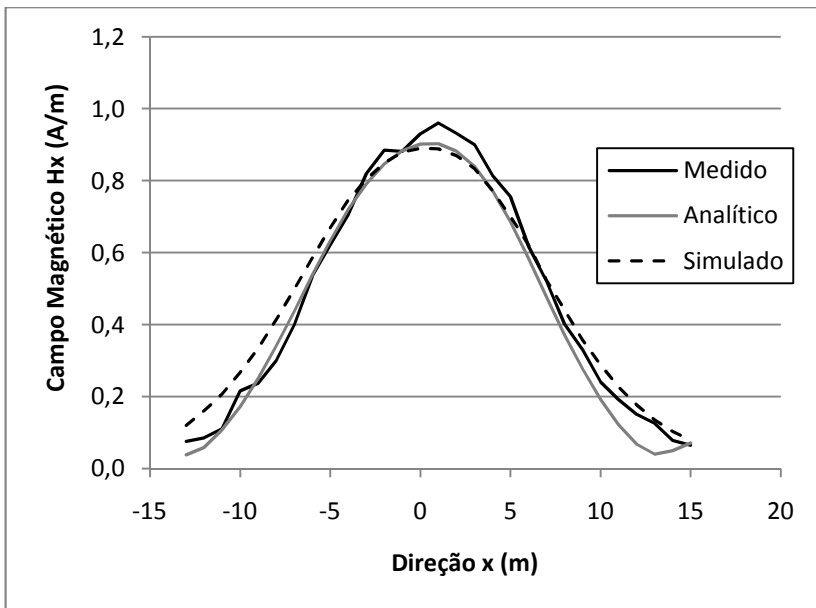


Figura 6.13 - Comparação entre os resultados analítico, numérico e medido para M02.

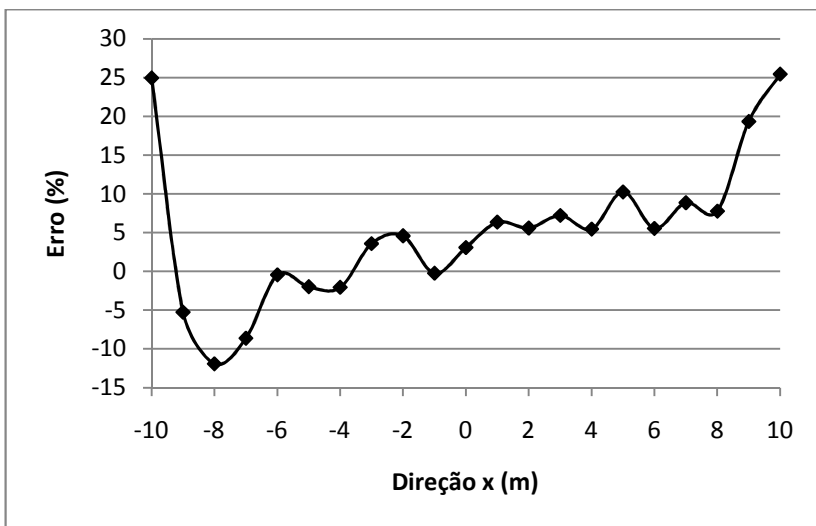


Figura 6.14 - Erro dos valores medidos em relação aos analíticos de M02.

Da mesma forma que ocorreu na avaliação de M01, os erros nos extremos do perfil se tornam proporcionalmente grandes devido aos valores pequenos de campo, não sendo levados em consideração na avaliação.

Ao avaliar as medições dos campos magnéticos levando em consideração os valores calculados, apresenta-se como a maior fonte de erro a necessidade de encontrar uma forma de garantir a geometria na execução da medição.

A orientação do corpo de prova no sentido vertical é de relativa facilidade de se obter, visto que o operador do equipamento pode se utilizar da gravidade para orientar o equipamento com facilidade, segurando o equipamento de medição de forma que ele possa pendular.

Desta forma, tomando-se o cuidado de marcar corretamente os pontos de medição no solo, a dificuldade maior torna-se garantir a correta distância da linha de medição em relação aos cabos que transportam as correntes. Isto não é tão trivial quando se leva em consideração os obstáculos urbanos.

É possível realizar uma comparação através de cálculos analíticos para determinar a relevância de se cometer o erro relativo ao desnível da calçada em relação à rua (cerca de 20 cm). Pelos resultados obtidos, observou-se uma diferença da ordem de 2,5%.

É ainda necessário atentar para os objetos presentes no ambiente de medição que possam causar alterações no campo magnético. O deslocamento de veículos pela avenida provoca alterações temporárias significativas nos campos, provocando oscilações nos valores medidos pelo equipamento, que podem levar até cerca de 30 segundos para voltar a estabilizar. A interferência causada pelos veículos trafegando pode ser notada a distâncias relativamente grandes, muitas vezes a algumas centenas de metros, já que no local estudado a linha de transmissão acompanhava o sentido da avenida por um longo trecho.

Para avaliar o local estudado em relação aos limites para a exposição humana, é necessário realizar o cálculo dos campos para o limite operacional da linha de transmissão. Para o caso analisado, este limite foi fornecido pelo DOS da Eletrosul e o cálculo é realizado pelo método analítico. A Tabela 6.5 mostra o resultado obtido, onde se pode

observar que os campos emitidos no local de estudo são muito aquém do limite estabelecido em legislação. Este cálculo é realizado levando em consideração a altura de 1,5 m do solo, como determina [4].

Tabela 6.5 - Campos magnéticos máximos nos locais de estudo.

LT	Limite Operacional	H_{máx}	H_{máx}/H_{limite}
Pal-Flo	694 A p/ fase	8,28 A/m	-87,4 %

6.2 Avaliação dos campos elétricos

O estudo dos campos elétricos foi realizado em duas linhas de transmissão de tensão nominal de 138 kV, de mesma geometria, pertencentes à Eletrosul.

A primeira medição, denominada de E01, foi realizada no dia 26 de novembro de 2010 entre as 08h30min e 09h00min, no mesmo ponto em que foi realizado o estudo dos campos magnéticos (ver Figura 6.1), sendo válidas as mesmas considerações sobre o local expressas para a análise do campo magnético, inclusive para a condutividade do solo. Esta LT liga as subestações de Palhoça e Florianópolis e as suas especificações são apresentadas na Tabela 6.1.

O método de execução das medições segue as normas e as recomendações descritas no capítulo 5, tendo sido realizada a marcação dos pontos de medição, e sendo utilizado um tripé para este fim e o leitor remoto acoplado por fibra ótica. Um instrumento de nível foi utilizado para garantir a orientação do corpo de prova em relação ao solo, de tal forma que o campo vertical, referido como E_y , seja medido com boa precisão. A altura foi aferida em cada ponto com uma trena.

O resultado obtido é apresentado na Figura 6.15, cujos valores numéricos são apresentados no Anexo 2.

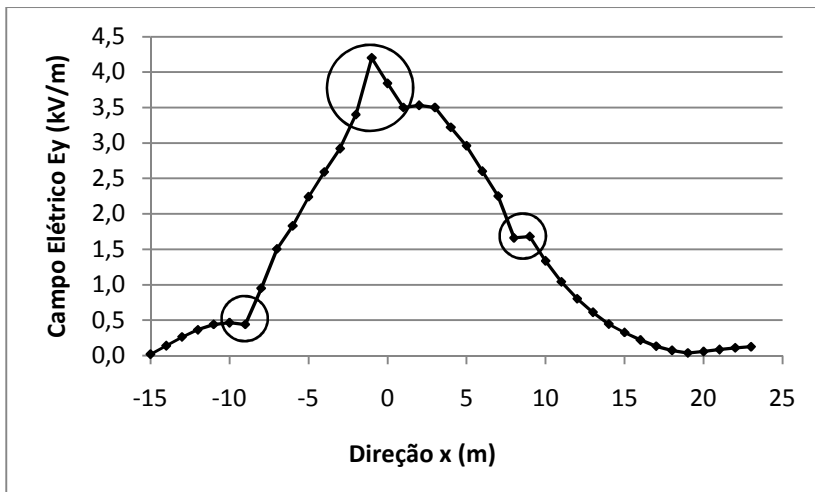


Figura 6.15 - Campo elétrico medido em E01.

É possível observar na Figura 6.15 que existem três descontinuidades na curva, uma em $x = -9$, outra em $x = -1, -2$ e -3 e em $x = 8$. Estes erros inseridos são consequência de desníveis no local de medição. O erro central foi induzido pela presença do canteiro central e, os dois nas laterais, pela diferença entre o nível da calçada e o da rua.

Assim como aconteceu na análise do campo magnético, o campo elétrico medido é comparado com resultados analíticos e numéricos.

Os resultados analíticos são calculados conforme os métodos expostos no capítulo 3, cujos resultados são obtidos através de algoritmo desenvolvido para o MATLAB que é apresentado no anexo 3.

Os resultados numéricos foram calculados através do *software* Gmsh/GetDP, utilizando a formulação apresentada no capítulo 4 para o campo elétrico.

A Figura 6.16 mostra o domínio de cálculo para a modelagem do campo elétrico no Gmsh para E01. O domínio de cálculo consiste dos sete cabos, do ar e do solo. A circunferência que delimita o domínio de cálculo possui um raio de 100 m, de forma que os erros de truncamento são desprezíveis. O solo é simulado com resistividade, sendo empregados os valores medidos em cada local.

Para a simulação são consideradas condições de contorno de Dirichlet em todo o limite do domínio de cálculo, sendo imposto o valor 0 V. Também são impostos os valores de tensões senoidais nos círculos que delimitam a região dos cabos, de acordo com os níveis de tensão no instante de medição. A malha 2D de elementos finitos é apresentada na Figura 6.17.

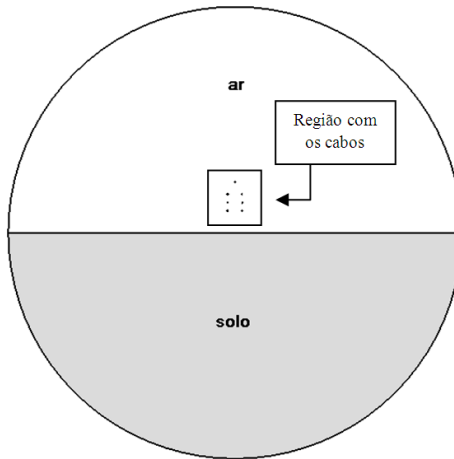


Figura 6.16 - Domínio de cálculo para a modelagem de campo elétrico.

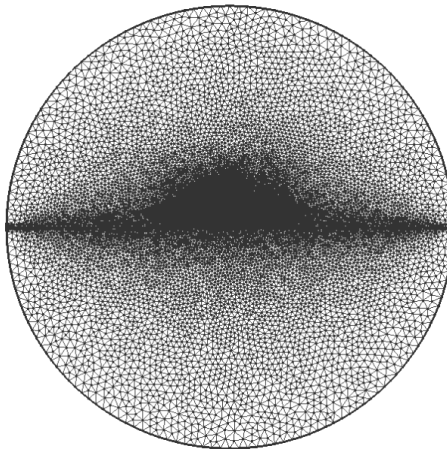


Figura 6.17 - Malha 2D do domínio de cálculo para a modelagem de campo elétrico.

Note que foram criadas algumas superfícies ao redor dos cabos e uma superfície ao redor dos sete cabos para haver uma distribuição de elementos mais uniforme e para facilitar a geração de malha com maior qualidade. Além disso, na região onde se mediu o campo elétrico, criou-se uma camada retangular para se obter elementos retangulares. A Figura 6.18 e a Figura 6.19 apresentam os detalhes das malhas ao redor de um cabo e dos sete cabos, respectivamente.

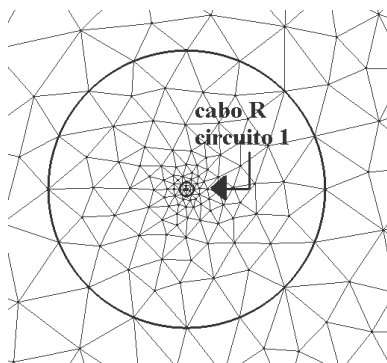


Figura 6.18 - Detalhe da malha na região do círculo em volta do cabo R do circuito 1

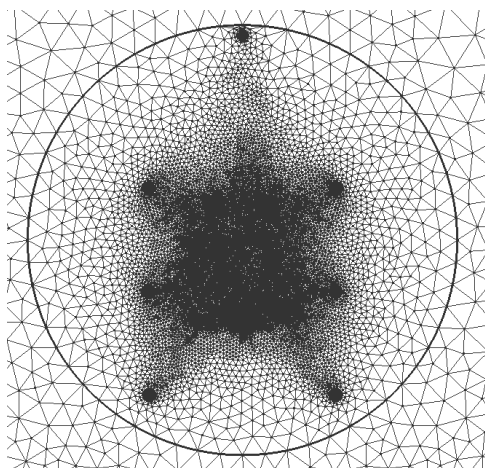


Figura 6.19 - Detalhe da malha na região do círculo em volta dos sete cabos.

Os resultados da simulação foram obtidos tendo como dados de entrada as tensões disponibilizadas pela Eletrosul, apresentadas na Tabela 6.6

Tabela 6.6 - Dados utilizados para a simulação realizada no GetDP para E01.

	Circuito 1	Circuito 2
Tensão Fase A - N	81,4 kV	81,3 kV
Tensão Fase B - N	81,4 kV	81,3 kV
Tensão Fase C - N	81,4 kV	81,3 kV

A Figura 6.20 mostra as linhas equipotenciais obtidas, sendo $\sigma = 1/145$ (S/m), onde $145 \Omega.m$ é o valor da resistividade do solo obtido em medição.

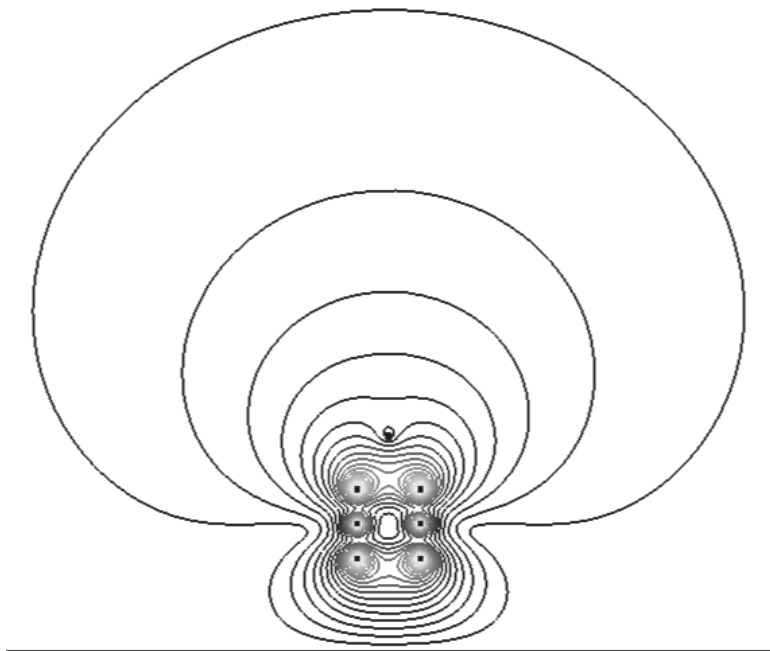


Figura 6.20 - Linhas equipotenciais da simulação no GetDP.

A Figura 6.21 apresenta a comparação entre os resultados numérico, analítico e de medição de E01. Esse resultado foi obtido na altura de 1 m em relação ao solo. Observa-se que os resultados analíticos e numéricos são inferiores ao resultado obtido na medição.

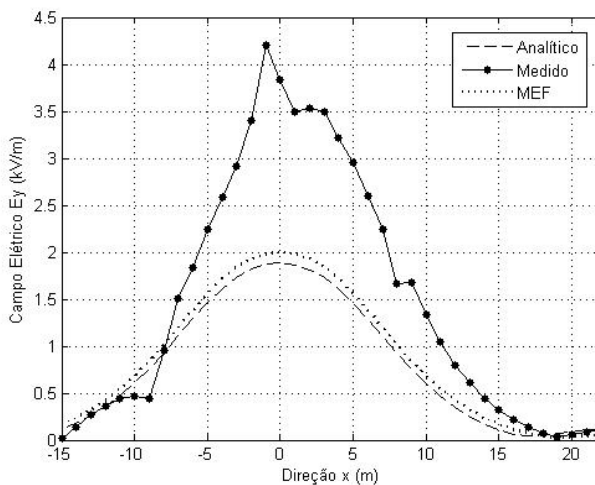


Figura 6.21 - Componente vertical do campo elétrico a 1 m de altura em relação ao solo para medição E01 e cálculos analíticos e numéricos.

Para a medição foi usado um tripé e, então, decidiu-se verificar o efeito desse suporte no resultado numérico do campo elétrico. Para isso, desenhou-se um corte transversal do tripé e este foi posicionado de acordo com medição do ponto $x = 0$, como mostra a Figura 6.22.

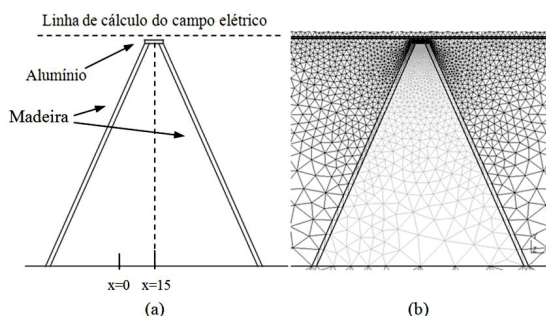


Figura 6.22 - Tripé inserido no domínio de estudo (a) e malha em detalhe (b).

O tripé utilizado possui seus “pés” constituídos de madeira e o seu topo em alumínio. Para a realização dos cálculos numéricos foi usado um valor de permissividade relativa igual a 4 para a madeira e uma condutividade de $3,5 \times 10^7$ para o alumínio [25]. É importante ainda salientar que o tripé está deslocado 15 cm em relação à $x = 0$, como ocorre na medição, sendo esta a distância do centro da sonda até o apoio do medido no tripé (veja Figura 5.5 e Figura 6.22).

A Figura 6.23 mostra os resultados do componente vertical do campo elétrico considerando o tripé. Observe que o valor do componente vertical do campo elétrico é bem superior para o caso onde o tripé foi utilizado, principalmente nos pontos imediatamente acima de seu topo. No ponto $x = 0$, obteve-se uma diferença de 34,77% no valor do campo, o que mostra o efeito significativo do tripé sobre os resultados de medição.

É importante ressaltar que a modelagem 2D do tripé foi uma solução aproximada, visto que o suporte não se estende ao longo da profundidade. Assim, destaca-se a importância da definição de uma metodologia de medição antes de realizar as medições de campo elétrico em linhas de transmissão.

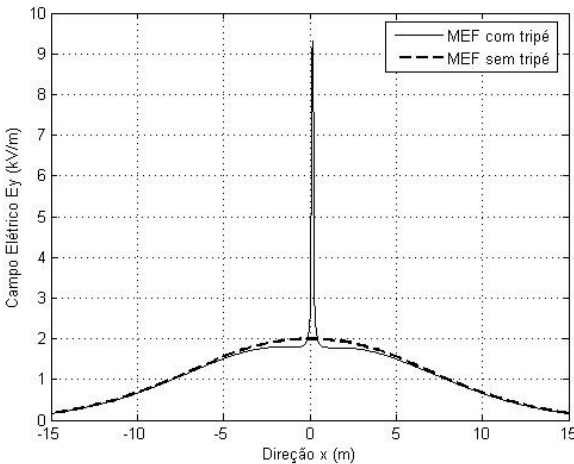


Figura 6.23 - Componente vertical do campo elétrico a 1 m de altura em relação ao solo com e sem o tripé para E01.

Com o objetivo de corrigir esse efeito sobre o cálculo numérico, considerou-se uma correção de 34,77% do resultado numérico obtido para o solo com condutividade $\sigma = 1/145$ (S/m). A Figura 6.24 mostra a comparação entre o resultado numérico corrigido e o resultado de medição. Nota-se que, com a correção, os valores do componente vertical do campo elétrico estão mais próximos dos resultados medidos quando comparados com valores da Figura 6.21.

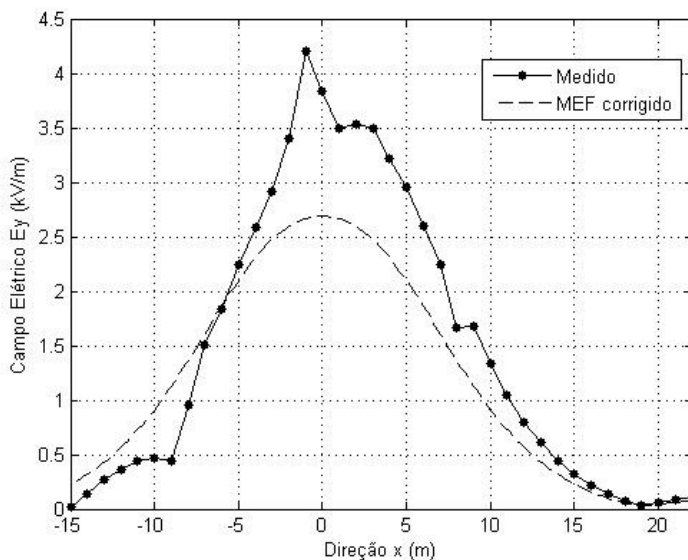


Figura 6.24 - Componente vertical do campo elétrico a 1 m de altura em relação ao solo considerando a solução corrigida com o tripé para E01.

A medição de campo elétrico E02 foi realizada no dia 10 de dezembro de 2010, entre 09h25min e 09h50min, na linha de transmissão que liga as subestações de Florianópolis e Biguaçu pertencente à Eletrosul. Esta linha de transmissão possui uma geometria idêntica à LT analisada anteriormente, como apresentado na Tabela 6.1.

Este novo local foi escolhido em virtude do primeiro local de medição, localizado na Av. Central de Palhoça, possuir um trânsito muito intenso de veículos, criando grandes dificuldades para a medição dos campos elétricos. Levando-se em consideração a necessidade da

utilização do tripé e da correção de sua altura e do paralelismo do corpo de prova em relação ao solo em cada ponto de medição, torna-se praticamente impossível realizar este trabalho sem provocar transtornos ao trânsito local.

A Figura 6.25 mostra o local onde foi realizada a medição E02, na Av. das Torres em São José - SC, onde a linha tracejada representa a linha de medição.



Figura 6.25 - Local da medição E02 na LT Florianópolis – Biguaçu.

Este local possui uma limitação em relação ao espaço para medição de 15 m para cada lado, que é a área onde foi realizada terraplanagem para construção da avenida. Além destes bordos, a inclinação do terreno impossibilita a medição. Cabe expor ainda que esta é uma região de urbanização recente, não existindo rede de distribuição na avenida que possam interferir nas medições executadas.

Para a avaliação de E02 foram empregadas as mesmas técnicas descritas na avaliação de campo elétrico exposta anteriormente, tanto

para medição como para os cálculos analíticos e numéricos. Também foi realizada a medição da resistividade do solo, obtendo-se 193,4 Ω .m.

A Figura 6.26 apresenta o campo elétrico medido em E02, onde são destacados os pontos que são os limites das calçadas e do canteiro central. Estes pontos apresentam descontinuidades nos valores medidos. Destaca-se ainda que em função das características do terreno, que possui inclinação além dos limites de medição, o campo elétrico possui uma assimetria em relação ao eixo central da LT. Pode-se observar que para os valores negativos da direção x os valores de campo são um pouco maiores, sendo este o lado mais alto do terreno.

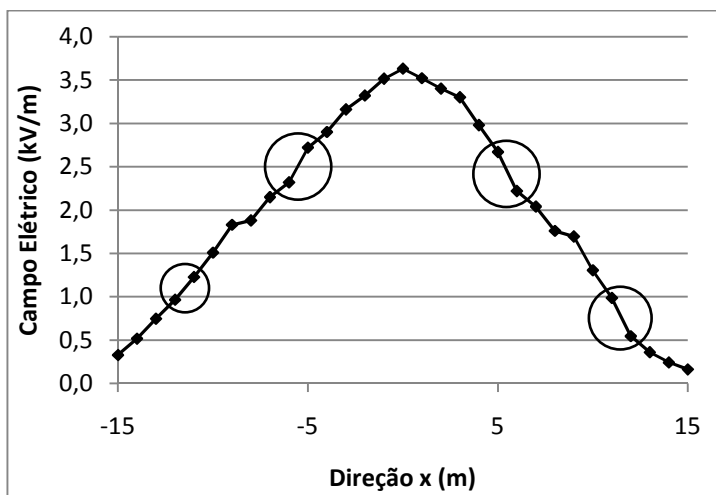


Figura 6.26 – Campo elétrico medido em E02.

A Tabela 6.7 apresenta as tensões utilizadas na simulação no GetDP, que foram fornecidas pela Eletrosul.

Tabela 6.7 - Dados utilizados para a simulação realizada no GetDP para E02.

	Circuito 1	Circuito 2
Tensão Fase A - N	81,5 kV	81,5 kV
Tensão Fase B - N	81,9 kV	81,9 kV
Tensão Fase C - N	81,5 kV	81,5 kV

A Figura 6.27 apresenta a comparação entre os resultados obtidos para a medição E02 e os cálculos analítico e numérico.

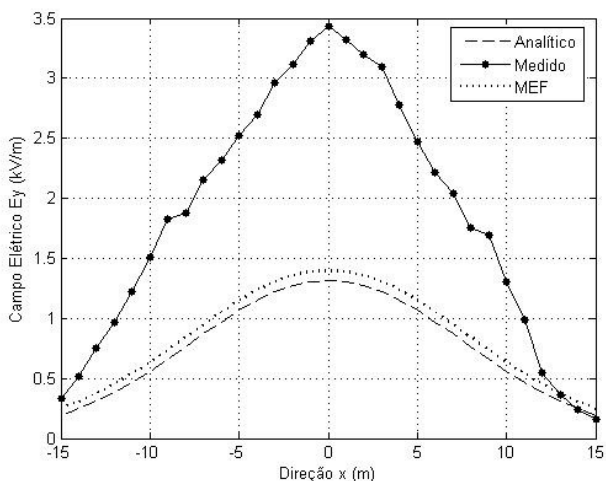


Figura 6.27 - Componente vertical do campo elétrico a 1 m de altura em relação ao solo para medição e cálculos analíticos e numéricos em E02.

Sendo realizada a avaliação da interferência do tripé nos campos medidos, a Figura 6.28 e a Figura 6.29 apresentam os resultados obtidos.

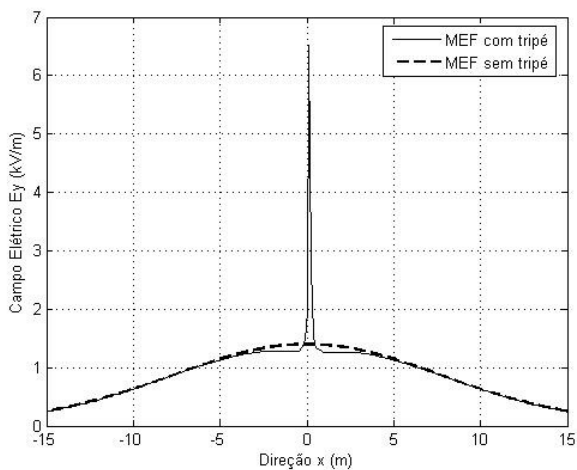


Figura 6.28 - Componente vertical do campo elétrico a 1 m de altura em relação ao solo com e sem o tripé para E02.

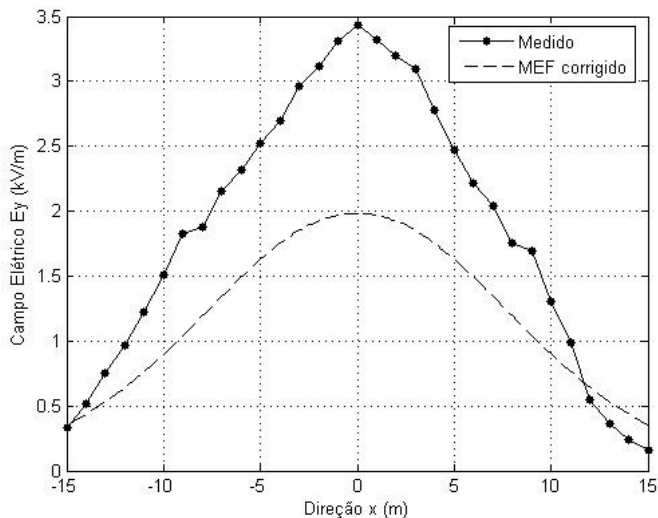


Figura 6.29 - Componente vertical do campo elétrico a 1 m de altura em relação ao solo considerando a solução corrigida com o tripé para E02.

Apesar dos resultados da simulação de E02 indicarem uma correção de 41,95%, novamente pode-se observar que os resultados medidos diferem muito dos resultados analíticos e numéricos.

É possível observar que mais uma vez os erros em relação às incertezas geométricas da medição estão presentes, e são mais contundentes que as observadas nos campos magnéticos.

Ainda foi realizada uma análise sobre a possível influência do suporte do aparelho de medição de campos elétricos e chegou-se a conclusão que este de fato pode influenciar, realizando-se uma correção através da modelagem numérica. Esta correção ainda carece de uma melhor avaliação.

Foi também observado nos trabalhos que os campos elétricos, ou pelo menos seus valores medidos, mudam com o passar do tempo (medições realizadas em dias diferentes). Isto não é esperado, visto que os as amplitudes das tensões nas linhas de transmissão são aproximadamente constantes.

Podem-se citar como exemplo os valores obtidos em diferentes medições para os dois pontos analisados anteriormente. O campo

analisado em E01 tem como valor máximo 3,53 kV/m. Todavia, também foi medido no mesmo local o valor sob o centro da LT de 4,65 kV/m. Para o local E02, além dos 3,63 kV/m expostos anteriormente, mediu-se 2,82 kV/m. A Tabela 6.8 apresenta os valores máximos obtidos para o campo elétrico nas avaliações realizadas.

Tabela 6.8 - Valores obtidos nas avaliações dos campos elétricos.

	Palhoça (E01)	Biguaçu (E02)
1ª medição	3,53 kV/m	3,63 kV/m
2ª medição	4,65 kV/m	2,82 kV/m
Analítico	1,88 kV/m	1,31 kV/m
Numérico	1,99 kV/m	1,39 kV/m
Numérico c/ tripé	2,69 kV/m	1,98 kV/m
Limite	4,16 kV/m	4,16 kV/m

Os valores apresentados na Tabela 6.8 levam em consideração a altura de 1 m do solo, de acordo com as normas apresentadas anteriormente [21]. Entretanto, a legislação brasileira determina que os níveis sejam estabelecidos para a altura de 1,5 m do solo [4].

Em razão de os valores calculados e medidos não convergirem, não se pode estabelecer o nível de campo a 1,5 m de altura do solo por intermédio de cálculos, seja pelos métodos analíticos ou numéricos utilizados. E quando leva-se em consideração que os valores medidos variam de forma inesperada, não é possível estabelecer nem mesmo um “fator de correção” para determinar os níveis de campo elétrico.

Os valores mostrados na Tabela 6.8 permitem estabelecer que os níveis de campo elétrico nos dois locais avaliados se aproximam dos limites permitidos, sendo que na segunda medição realizada em E01 o limite é excedido. Todavia, sem compreender a razão de os modelos matemáticos divergirem dos valores medidos e o como os valores medidos mudam ao longo do tempo, torna-se difícil estabelecer se o local analisado cumpre ou não a legislação.

Os erros obtidos reproduzem o que já havia sido obtido em [30]. Em [43] é discutida a dificuldade de se realizar a comparação entre resultados calculados e medidos, sendo reportados erros e alguns de seus possíveis motivos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de dissertação foi desenvolvido com o objetivo de avaliar medições de campos elétricos e magnéticos considerando os limites para exposição humana. Para atingir tal objetivo, foi realizada uma comparação entre valores medidos e calculados. Ainda foi efetuada uma análise em campo das possíveis fontes de erro e procurou-se identificá-las através da análise dos resultados.

A limitação dos campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão se justifica pela possibilidade destes causarem danos à saúde. Embora os estudos científicos sobre o assunto não sejam conclusivos, a exposição prolongada a campos magnéticos de baixa frequência é considerada como possível fator de desenvolvimento de leucemia infantil.

A resolução dos cálculos analíticos foi feita com base em métodos consagrados, tendo sido confeccionados algoritmos computacionais para a sua execução.

Os campos magnéticos foram avaliados utilizando o EFCAD, um *software* de elementos finitos desenvolvido pelo GRUCAD de renome na comunidade científica. Este *software* se divide em diversos módulos, tendo sido utilizado o módulo denominado de EFCC, que possui a capacidade de realizar cálculos de campos magnéticos em regime harmônico.

Os resultados obtidos demonstram uma boa conformidade para os campos magnéticos, levando em consideração os resultados analíticos, numéricos e medidos.

Os cálculos de campo elétrico em regime harmônico foram realizados utilizando a ferramenta Gmsh/GetDP, desenvolvida na Université de Liège, Bélgica.

Os resultados obtidos demonstraram um erro significativo entre os valores medidos e os calculados. Dentre as hipóteses avaliadas para justificar a diferença está a de que o suporte do medidor causasse distorções. Assim, verificou-se a influência do suporte do medidor

através do cálculo numérico do campo elétrico e foi constatado um aumento da intensidade na região medida.

Ao se avaliar os resultados das medições de campos elétricos, realizando uma comparação dos valores calculados analítica e numericamente (com e sem o suporte), é evidente uma grande incoerência entre as amplitudes dos resultados. Desta forma, o que se estabelece é que a medição de campos elétricos em linhas de transmissão precisa ser melhor investigada.

Tanto para os campos elétricos como magnéticos foi possível observar que os obstáculos urbanos (desníveis no terreno de medição, calçadas, postes, muros, e outros) influenciam nas medições realizadas causando erros nos valores medidos, mas que se tomadas as devidas precauções, não são significativos. As medições de campos elétricos se mostraram mais sensíveis às fontes de erro.

Em relação aos limites à exposição humana, os pontos avaliados possuem níveis de campo magnético muito aquém dos limites da legislação vigente.

No entanto, os campos elétricos avaliados estão próximos dos limites estabelecidos, sendo que os problemas encontrados na avaliação não permitem determinar se em um dos locais avaliados o limite é respeitado. Assim, a análise do campo elétrico requer maior investigação.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

É bastante evidente que a necessidade de avaliar melhor a influência do suporte do medidor na medição do campo elétrico. Idealmente esta modelagem é tridimensional, o que hoje não é possível de realizar devido à impossibilidade de se malhar um modelo que envolve dimensões tão discrepantes.

Em trabalhos futuros deve ser utilizado um suporte para o medidor que não influencie as medições dos campos elétricos, ou que pelo menos influencie de forma menos significativa. Para isto, deve-se evitar ao máximo o uso de materiais condutores na sua constituição.

Outra demanda é a necessidade de se avaliar os campos nos espaços laborais, principalmente em subestações. Este trabalho é especialmente difícil devido à dificuldade de criar modelos para estes ambientes.

Seria relevante ainda realizar o monitoramento de longo prazo dos campos elétricos emitidos por linhas de transmissão, de forma que se possa analisar quais as variáveis que influenciam as medições.

8 ANEXOS

8.1 Anexo 1 – Folha de dados para medição

Folha de Dados para Medição de Campo em Linha de Transmissão

1. Tensão de Linha
 - a. Nominal
 - b. Real
2. Corrente de Linha
 - a. Nominal
 - b. Real
3. Condutores da Linha
 - a. Tipo
 - b. Diâmetro
 - c. Altura
 - d. Relação de fase
 - e. Esboço da configuração da linha
4. Condutores de Proteção (Cabos guarda)
 - a. Tipo
 - b. Diâmetro
 - c. Altura
5. Condições atmosféricas
 - a. Temperatura
 - b. Umidade relativa
 - c. Pressão barométrica
 - d. Velocidade do vento
6. Torres
 - a. Material
 - b. Esboço
7. Número de medidas
8. Instrumentos
 - a. Fabricante
 - b. Modelo
 - c. Característica de leitura (rms, twa, valor máximo, etc.)
 - d. Dispositivo de suporte
 - i. Dimensões
 - ii. Características eletromagnéticas
9. Hora
 - a. Início
 - b. Fim

8.2 Anexo 2 – Valores numéricos

8.2.1 Valores de M01

Valores em A/m da medição, dos cálculos analíticos e das simulações para M01, do dia 26/11/2010.

x	Medido	Análítico	Simulado				
-15	0,12	0,16	0,21	4	1,40	1,61	1,70
-14	0,11	0,11	0,26	5	1,26	1,41	1,54
-13	0,13	0,09	0,34	6	1,05	1,19	1,36
-12	0,25	0,15	0,43	7	0,86	0,97	1,14
-11	0,35	0,27	0,55	8	0,66	0,75	0,96
-10	0,47	0,42	0,68	9	0,54	0,55	0,78
-9	0,64	0,61	0,84	10	0,39	0,38	0,63
-8	0,82	0,83	1,02	11	0,28	0,23	0,50
-7	1,05	1,06	1,24	12	0,18	0,12	0,39
-6	1,23	1,30	1,41	13	0,16	0,08	0,30
-5	1,42	1,53	1,59	14	0,11	0,12	0,23
-4	1,61	1,72	1,76	15	0,13	0,17	0,18
-3	1,68	1,87	1,88	16	0,14	0,21	0,14
-2	1,80	1,97	1,97	17	0,18	0,24	0,11
-1	1,85	2,01	2,01	18	0,18	0,26	0,08
0	1,90	2,01	2,02	19	0,21	0,27	0,06
1	1,84	1,97	2,00	20	0,22	0,28	0,05
2	1,75	1,89	1,94	21	0,21	0,29	0,04
3	1,64	1,77	1,84	22	0,22	0,29	0,04
				23	0,22	0,29	0,03

8.2.2 Valores de M02

Valores em A/m da medição, dos cálculos analíticos e das simulações para M02, do dia 27/12/2010.

x	Medido	Analítico	Simulado
-13	0,076	0,038	0,121
-12	0,085	0,059	0,161
-11	0,111	0,108	0,208
-10	0,216	0,173	0,268
-9	0,238	0,251	0,334
-8	0,300	0,341	0,414
-7	0,400	0,438	0,499
-6	0,535	0,537	0,585
-5	0,621	0,634	0,669
-4	0,705	0,720	0,746
-3	0,820	0,792	0,804
-2	0,885	0,846	0,849
-1	0,881	0,883	0,878
0	0,930	0,902	0,891
1	0,960	0,903	0,888
2	0,932	0,883	0,870
3	0,900	0,839	0,833
4	0,815	0,773	0,772
5	0,756	0,686	0,701
6	0,617	0,585	0,620
7	0,520	0,478	0,524
8	0,402	0,373	0,441
9	0,330	0,277	0,357
10	0,241	0,192	0,289
11	0,192	0,122	0,227
12	0,151	0,068	0,178
13	0,126	0,040	0,136
14	0,079	0,050	0,104
15	0,065	0,072	0,079

8.2.3 Valores de E01

x	Analítico	Medido	Simulado	5	1455,7	2960,0	1569,0
-15	118,1	19,7	172,4	6	1283,7	2600,0	1377,3
-14	181,2	139,3	229,9	7	1102,1	2250,0	1216,7
-13	260,3	264,0	317,6	8	921,7	1660,0	1025,0
-12	356,8	364,0	424,5	9	751,4	1680,0	834,7
-11	472,3	440,0	542,0	10	596,9	1336,0	672,3
-10	607,3	464,0	672,6	11	461,1	1041,0	543,0
-9	761,1	440,0	835,0	12	345,0	802,0	424,2
-8	930,7	950,0	1010,0	13	247,9	612,0	317,3
-7	1110,3	1504,0	1188,3	14	168,5	445,0	229,0
-6	1291,2	1830,0	1381,5	15	105,8	326,0	172,0
-5	1462,3	2240,0	1571,0	16	61,3	220,0	111,2
-4	1612,5	2590,0	1706,0	17	44,1	133,4	73,9
-3	1732,9	2920,0	1836,6	18	55,7	73,8	39,7
-2	1818,7	3400,0	1928,1	19	74,8	38,5	24,3
-1	1868,9	4200,0	1974,9	20	91,9	57,6	31,7
0	1884,9	3840,0	1993,9	21	105,6	85,2	42,9
1	1867,3	3500,0	1976,6	22	116,0	109,8	55,3
2	1815,6	3530,0	1931,2				
3	1728,5	3500,0	1836,0				
4	1606,9	3220,0	1710,2				

8.2.4 Valores de E02

x	Medido	Analítico	Simulado
-15	328,0	189,6	249,6
-14	517,0	246,0	310,6
-13	748,0	311,5	370,4
-12	966,0	386,4	447,3
-11	1228,0	470,3	539,6
-10	1509,0	562,6	634,4
-9	1830,0	661,7	738,8
-8	1880,0	765,3	848,2
-7	2150,0	870,1	944,7
-6	2320,0	972,1	1058,8
-5	2520,0	1067,1	1148,7
-4	2700,0	1150,8	1236,1
-3	2960,0	1219,4	1305,2
-2	3120,0	1270,3	1352,0
-1	3314,0	1301,4	1387,9

0	3430,0	1311,9	1396,9
1	3320,0	1301,4	1386,5
2	3200,0	1270,3	1352,9
3	3100,0	1219,4	1305,3
4	2780,0	1150,8	1234,6
5	2470,0	1067,1	1148,4
6	2220,0	972,1	1048,5
7	2040,0	870,1	944,7
8	1760,0	765,3	836,5
9	1695,0	661,7	738,7
10	1306,0	562,6	635,4
11	986,0	470,3	539,6
12	546,0	386,4	450,7
13	361,0	311,5	370,4
14	243,0	246,0	249,4
15	163,0	189,6	197,6

8.3 Anexo 3 – Algoritmos de cálculo de campos em LT

8.3.1 Campos magnéticos

```

%-----%
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica / GRUCAD %
% Orientador: Mauricio Valencia %
% Mestrando: Tiago Guedes %
%-----%
%-----%
% Cálculo Analítico de Campo Magnético em LT %
% Arquivo de entrada de Dados %
%-----%

clc
clear all

% Opção para unidade do resultado ( A/m ou T )
%-----
op=1; % 1 = A/m (Campo magnetico)
      % 2 = Tesla (Indução magnetica)

% Linha de Transmissão de 138 kV Eletrosul
% Palhoça-Florianopolis Circuito Duplo Vertical
%-----

% Leitura de dados
%-----
misolo=1; %permissividade relativa do solo
Rsolo=145; %resistividade do solo (ohms.m)

cx=[26.75,26.75,26.75,33.25,33.25,33.25]; %valores da coordenada x dos condutores
cy=[9.75,13.35,16.95,9.75,13.35,16.95]; %valores da coordenada y dos condutores

modI=[178,182,185,177,174,173]; %modulo das correntes em cada fase
angI=[0,120,240,0,120,240]; %angulo das corrente em cada fase
f=60; %frequencia de operação da LT

dl=30; %distancia lateral para calculo
h=1; %altura de medição

Cmag;
CarsonM;

```

```

%-----%
% Universidade Federal de Santa Catarina %
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica %
% Grupo de Concepção e Analise de Dispositivos Eletromagneticos %
% Orientador: Mauricio Valencia %
% Mestrando: Tiago Guedes %
%-----%
%-----%
% Cálculo Analítico de Campo Magnético em LT %
% Cmag %
%-----%

% Constantes e variáveis auxiliares
%-----

if (op==1)
    mi0=1;
else
    mi0=4*pi*10^-7;
end;
d=[-dl+1:1:dl];
p=2*dl;

% Conversão das Correntes para complexo
%-----

nI=length(modI);

for j=1:nI
    anglr(j) = angl(j)/360*2*pi; %transformação de graus para radianos
    I(j)=modI(j)*exp(i*anglr(j)); %passagem para valores de corrente em complexo
end

% Calculo do campo magnetico
%-----

for x=1:p % Calculo das contribuicoes de cada fio
    % para o calculo do campo

    for k=1:nI

        Hxk(x,k) = (mi0/(2*pi))*I(k)*(cy(k)-h)/((cx(k)-x)^2+(cy(k)-h)^2);
        % x = posicao do ponto de calculo

        Hyk(x,k) = (mi0/(2*pi))*I(k)*(cx(k)-x)/((cx(k)-x)^2+(cy(k)-h)^2);
        % k = condutor em calculo
    end
end

```

```

end

Hxtemp = 0;
Hytemp = 0;

for n=1:nI          % Somatorio das contribuicoes de cada condutor

    Hxt(x)=Hxtemp + Hxk(x,n);    % Hxtemp e Hytemp são variáveis temporarias
    Hxtemp = Hxt(x);            % para realizar o somatorio

    Hyt(x) = Hytemp + Hyk(x,n);
    Hytemp = Hyt(x);

end

H(x)=sqrt(abs(Hxt(x))^2+abs(Hyt(x))^2);
Bx(x)=abs(Hxt(x));
By(x)=abs(Hyt(x));

end

hold all
plot (d,H,'--');
plot (d,Bx,'--');
plot (d,By,'--');
grid on

%-----%
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica / GRUCAD %
% Orientador: Mauricio Valencia %
% Mestrando: Tiago Guedes %
%-----%
%-----%
% Cálculo Analítico de Campo Magnético em LT %
% Metodo de Carson - CarsonM %
%-----%

% Constantes e variáveis auxiliares
%-----
d=[-dl+1:1:dl];
pc=2*dl;

```

```

if (op==1)
    mi0=1;
else
    mi0=4*pi*10^-7;
end;

% Conversão das Correntes para complexo
%-----

nI=length(modI);

for j=1:nI
    anglr(j) = angI(j)/360*2*pi;    %transformação de graus para radianos
    I(j)=modI(j)*exp(i*anglr(j));  %passagem para valores de corrente em complexo
end

% Calculo da profundidade de penetração
%-----
sigma=1/Rsolo;

p=503*sqrt(sigma/f);

% Calculo do campo magnetico
%-----

for x=1:pc                                % Calculo das contribuicoes de cada fio
    for k=1:nI                              % para o calculo campo

        % real
        Hxk(x,k) = (mi0/(2*pi))*I(k)*(cy(k)-h)/((x-cx(k))^2+(cy(k)-h)^2);
                                                % x = posicao do ponto de calculo
        Hyk(x,k) = (mi0/(2*pi))*I(k)*(x-cx(k))/((x-cx(k))^2+(cy(k)-h)^2);
                                                % k = condutor em calculo

        %imagem
        Hixk(x,k) = (mi0/(2*pi))*I(k)*(p+h)/((x-cx(k))^2+(p+h)^2);
        Hiyk(x,k) = (mi0/(2*pi))*I(k)*(x-cx(k))/((x-cx(k))^2+(p+h)^2);

    end

    Hxtemp = 0;
    Hytemp = 0;
    Hixtemp = 0;
    Hiytemp = 0;

    for n=1:nI                              % Somatorio das contribuicoes de cada condutor

```

```

%real
Hxt(x)=Hxtemp + Hxk(x,n);      % Hxtemp e Hytemp são variáveis temporárias
Hxtemp = Hxt(x);              % para realizar o somatório

Hyt(x) = Hytemp + Hyk(x,n);
Hytemp = Hyt(x);

%imag
Hixt(x)=Hixtemp + Hixk(x,n);   % Hixtemp e Hiytemp são variáveis temporárias
Hixtemp = Hixt(x);            % para realizar o somatório

Hiyt(x) = Hiytemp + Hiyk(x,n);
Hiytemp = Hiyt(x);

end

Bxt(x)=Hxt(x)-Hixt(x);
Byt(x)=Hyt(x)-Hiyt(x);

H(x)=sqrt(abs(Bxt(x))^2+abs(Byt(x))^2);
Bx(x)=abs(Bxt(x));
By(x)=abs(Byt(x));

end

hold all
plot (d,H,'-');
plot (d,Bx);
plot (d,By,'-');

```

8.3.2 Campos Elétricos

```

%-----%
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica / GRUCAD %
% Orientador: Mauricio Valencia %
% Mestrando: Tiago Guedes %
%-----%
%-----%
% Cálculo Analítico de Campo Elétricos em LT %
% Arquivo de entrada de dados %
%-----%

```

```
clc
clear all
```

```
% Linha de Transmissão de 138 kV Eletrosul
```

```
% Exemplo Willian I
```

```
%-----
```

```
cx=[26.75,26.75,26.75,33.25,33.25,33.25]; %valores da coordenada x dos condutores
```

```
cy=[12.45,16.05,19.65,12.45,16.05,19.65]; %valores da coordenada y dos condutores
```

```
modV=[80,80,80,80,80,80]; %modulo das tensoes em cada fase
```

```
angV=[0,120,240,0,120,240]; %angulo das tensoes em cada fase
```

```
rC=.011; %raio dos condutores
```

```
dl=30; %distancia lateral para calculo
```

```
h=1; %altura de medição
```

```
Celet;
```

```
%-----%
```

```
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica / GRUCAD %
```

```
% Orientador: Mauricio Valencia %
```

```
% Mestrando: Tiago Guedes %
```

```
%-----%
```

```
%-----%
```

```
% Cálculo Analítico de Campo Elétricos em LT %
```

```
% Métodos das Cargas Equivalentes %
```

```
%-----%
```

```
% Constantes e variáveis auxiliares
```

```
%-----
```

```
eps0=8.854*10^-12;
```

```
d=[-dl+1:1:dl];
```

```
p=2*dl;
```

```
% Conversão das Correntes para complexo
```

```
%-----
```

```

nV=length(modV);

for j=1:nV
    angVr(j) = angV(j)/360*2*pi;    %transformação de graus para radianos
    V(j)=modV(j)*exp(i*angVr(j));  %passagem para valores de corrente em complexo
end

% Calculo das distancias entre os condutores
%-----

for m=1:nV
    for n=1:nV
        D(m,n) = sqrt(((cx(m)-cx(n))^2)+(cy(m)-cy(n))^2);
        Di(m,n)= sqrt(((cx(m)-cx(n))^2)+(cy(m)+cy(n))^2);
    end
end

% Calculo dos coeficientes de potencial
%-----

for j=1:nV
    for k=1:nV
        if j==k

            lambda(j,k)=(1/(2*pi*eps0))*log(2*cy(j)/rC);

        else

            lambda(j,k)=(1/(2*pi*eps0))*log(Di(j,k)/D(j,k));

        end
    end
end

% Calculo da cargas equivalentes dos condutores
%-----

C=lambda^-1;    %Inversão da matriz dos coeficientes

Q = V*C;

% Calculo do Campo Eletrico
%-----

```

```

for x=1:p                % Calculo das contribuicoes de cada fio para o calculo do campo
                        % x = posicao do ponto de calculo , k = condutor em calculo
    for k=1:nV

        Exk(x,k) = (1/(2*pi*eps0))*Q(k)*( (x-cx(k))/((x-cx(k))^2+(h-cy(k))^2) - (x-cx(k))/((x-
cx(k))^2+(h+cy(k))^2) );

        Eyk(x,k) = (1/(2*pi*eps0))*Q(k)*( (h-cy(k))/((x-cx(k))^2+(h-cy(k))^2) - (h+cy(k))/((x-
cx(k))^2+(h+cy(k))^2) );

    end

    Extemp = 0;
    Eytemp = 0;

    for u=1:nV                % Somatorio das contribuicoes de cada condutor

        Ext(x)=Extemp + Exk(x,u);    % Extemp e Eytemp são variáveis temporarias
        Extemp = Ext(x);            % para realizar o somatorio

        Eyt(x) = Eytemp + Eyk(x,u);
        Eytemp = Eyt(x);

    end

    Em(x)=sqrt(abs(Ext(x))^2+abs(Eyt(x))^2);
    Ex(x)=abs(Ext(x));
    Ey(x)=abs(Eyt(x));

end

hold all
plot (d,Em,'--');
plot (d,Ex);
plot (d,Ey);
grid on

```


9 BIBLIOGRAFIA

- [1] RAMIREZ, J. A. Campos Eletromagnéticos Devido a Sistemas de Energia Elétrica. Anais:Efeitos Biológicos Devidos à Ação de Campos Eletromagnéticos. São Paulo, Brasil: [s.n.]. 2001.
- [2] BAKHASHWAIN, J. M. et al. Magnetic Fields Measurement and Evaluation of EHV Transmission Lines in Saudi Arabia. Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN. [S.l.]: [s.n.]. 2003.
- [3] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Lei 11.934. Diário Oficial da União, Brasília, 5 Maio 2009.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa N° 398. Diário Oficial da União, Brasília, 29 março 2010. 70.
- [5] PINHO, A. C. O Cálculo do Campo Elétrico em 2D Gerado por Linhas de Transmissão e o Efeito em Seres Vivos. Dissertação de Mestrado. UFSC. Florianópolis, Brasil. 1994.
- [6] BECKER, W. D. Estudo de Técnicas para Redução de Campos Magnéticos Gerados por Linhas de Transmissão de Potência. Dissertação de Mestrado, UFSC. Florianópolis. 2008.
- [7] CARSON, J. R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. Bell System Technical Journal, October 1926. 539-554.
- [8] OLSEN, R. G. On the Exact, Carson and Image Theories for Wires. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, April 1983. 769-778.
- [9] IEEE MAGNETIC FIELD TASK FORCE. Magnetic Fields from Electric Power Lines - Theory and Comparison to Measurement. IEEE Transactions on Power Delivery, October 1988. 2127-2136.
- [10] MALIK, N. H. A Review of the Charge Simulation Method and its Applications. IEEE Transactions on Electrical Insulation,

February 1989. 325-332.

[11] OLSEN, R. G.; CHARTIER, V. L. The Performance of Reduced Magnetic Field Power Line - Theory and Measurements on an Operating Line. IEEE Transactions on Power Delivery, July 1993. 1430-1442.

[12] TAKUMA, T.; KAWAMOTO, T.; FUJINAMI, H. Charge Simulation Method with Complex Fictitious Charges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, November 1981. 1665-4672.

[13] KHEIFETS, L.; OKSUZYAN, S. Exposure Assesment and Other Challenges in Nonionizing Radiation Studies of Childhood Leukemia. Radiation Protection Dosimetry, 2008. Vol. 132, No. 2, pp. 139–147.

[14] OMS. Fact Sheet N° 322 - Campos Eletromagnéticos e Saúde Pública - Exposição a Campos de Freqüência Extremamente Baixa. [S.l.]. 2007.

[15] SCHULZ, J.; AHLBOM, A. Exposure to Electromagnetic Fields and the Risk of Childhood Leukemia: a Review. Radiation Protection Dosimetry. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. Vol. 132, No. 2, pp. 202–211.

[16] ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electromagnetic Fields. [S.l.]. 1998.

[17] FRANÇA, A. M. et al. Segurança Laboratorial Durante a Execução de Serviços de Calibração em Alta Tensão e Alta Corrente. Encontro para a Qualidade de Laboratórios – REMESP. São Paulo, Brasil: [s.n.]. 2005.

[18] KÜHN, S.; KUSTER, N. Experimental EMF Exposure Assessment. In: BARNES, F. S.; GREENEBAUM, B. Bioengineering and Biophysical Aspects of Electromagnetic Fields. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2007. p. 381-409.

[19] SIAVE, N. et al. Electric Field and Human Body: a New Challenge for Electromagnetic Field Computation. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and

Electronic Engineering, p. 457-469, 2007.

[20] IEEE. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0–3 kHz. New York, USA. 2002.

[21] IEEE. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines. New York, USA. 2008.

[22] IEEE. IEEE Guide for the Measurement of Quasi-Static Magnetic and Electric Fields. New York, USA. 2008.

[23] ABNT. Exposição a Campos Elétricos e Magnéticos de 50 e 60 Hz. Rio de Janeiro, p. 39. 2000.

[24] KEIKKO, T. Technical Management of the Electric and Magnetic Fields in Electric Power System. Thesis. Tampere University of Technology. Tampere, Finland. 2003.

[25] BASTOS, J. P. A. Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática. Florianópolis, Brasil: Editora da UFSC, 2008.

[26] REITZ, J. R.; MILFORD, F. J. Foundations of Electromagnetic Theory. 2^a. ed. Palo Alto, USA: Addison-Wisley Publishing Company, 1967.

[27] BECKER, W. D.; JR., W. P. C.; BASTOS, J. P. A. Campos Magnéticos Gerados por Linhas de Transmissão de Potência. Anais Momag 2010. Vila Velha, Brasil: [s.n.]. 2010.

[28] DENO, D. W. Transmission Line Fields. IEEE Transaction in Power Apparatus and Systems, September/October 1976. 1600-1611.

[29] FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica. 1^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 1977.

[30] BECKER, W. D.; JR., W. P. C.; BASTOS, J. P. A. Campos Elétricos Gerados por Linhas de Transmissão de Potência. Anais Momag 2010. Vila Velha, Brasil: [s.n.]. 2010.

[31] CAMARGO, C. C. B. Transmissão de energia elétrica: Aspectos Fundamentais. 3^a. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006.

- [32] FERREIRA DA LUZ, M. V. Desenvolvimento de um software para cálculo de campos eletromagnéticos 3D utilizando elementos de aresta, levando em conta o movimento e o circuito de alimentação. Tese de Doutorado, UFSC. Florianópolis, p. 91. 2003.
- [33] FERREIRA DA LUZ, M. V.; MOLINA, F. H.; AREND, E. R. Study of Insulator Performance under Contaminated Conditions Using a 3D Formulation of Quasi-Static Electric Fields. 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation - CEFC. Chicago: [s.n.]. 2010.
- [34] WEIDA, D. et al. Electro-quasistatic High Voltage Field Simulation of Large Scale 3D Insulator Structures Including 2D Models for Conductive Pollution Layers. In: SŁAWOMIR WIAK, A. K. I. D. Advanced Computer Techniques in Applied Electromagnetics. Amsterdam: IOS PRESS, v. 30, 2008. p. 431-437.
- [35] ABNT. Medição dos campos magnéticos e elétricos de baixa frequência considerando a exposição de seres humanos. Rio de Janeiro, Brasil. 2000.
- [36] IEEE. IEEE Recommended Practice for Instrumentation - Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters — 10 Hz to 3 kHz. New York, USA. 1994.
- [37] IEC. Méthodes de mesures des champs électromagnétiques des appareils électrodomestiques et similaires en relation avec l'exposition humaine. Geneva, p. 63. 2005.
- [38] CENELEC. Human Exposure Fields, Low Frequency (0 Hz to 10 kHz). [S.l.]. 1995.
- [39] HOLADAY INDUSTRIES, INC. HI-3604 ELF Survey Meter User's Manual. Eden Praire: [s.n.], 1992.
- [40] DIPLACIDO, J.; SHIH, C. H.; WARE, B. J. Analysis of the Proximity Effects in Electric Field Measurements. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, N.Y., Nov 1978. 2167-2177.
- [41] KINDERMAN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. Aterramento Elétrico. 5ª. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2002.

- [42] AREND, E. R. Estudo de Aterramento em Baixas Frequências Usando a Formulação Eletrocinética ao Método de Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado, UFSC. Florianópolis, p. 79. 2009.
- [43] KEIKKO, T.; ISOKORPI, J.; KORPINEN, L. Practical Problems in Calculating Electric Fields of Transmission Lines. High Voltage Engineering Symposium - Conference Publication N° 467. London: IEEE. 1999. p. 2.103.P6-2.106.P6.