

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Ciro José Egoavil Montero

**MONITORAMENTO REMOTO E SEGURO DO CAMPO MAGNÉTICO
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO**

Santa Maria, RS
2017

Ciro José Egoavil Montero

**MONITORAMENTO REMOTO E SEGURO DO CAMPO MAGNÉTICO EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Felix Alberto Farret

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Egoavil Montero, Ciro José
Monitoramento remoto e seguro do campo magnético em
linhas de transmissão de alta tensão / Ciro José Egoavil
Montero.- 2017.
125 p.; 30 cm

Orientador: Felix Alberto Farret
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2017

1. Campo magnético 2. monitoramento contínuo 3.
monitoramento remoto 4. linhas de transmissão I. Farret,
Felix Alberto II. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Ciro José Egoavil Montero. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Alameda Roquete Pinto, n. 4482, Bairro Nova Esperança, Porto Velho, RO. CEP: 76822-180 Fone (0xx) 69 2182 2241; E-mail: ciro.egoavil@unir.br

Ciro José Egoavil Montero

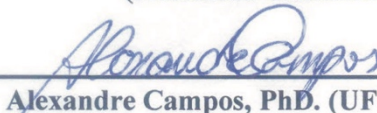
**MONITORAMENTO REMOTO E SEGURO DO CAMPO MAGNÉTICO EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 17 de abril de 2017:



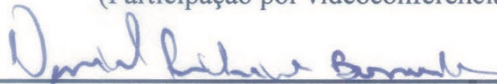
Felix Alberto Farret, PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



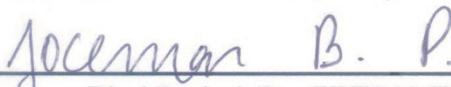
Alexandre Campos, PhD. (UFSM)



Carlos A. Tenório de Carvalho Júnior, Dr. (UNIR)
(Participação por videoconferência)



Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)



Jocemar Biasi Parizzi, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2017

DEDICATÓRIA

À Naida quem sempre está comigo, a José in Memoriam,
à Juçara pela sua determinação e apoio e aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi elaborado graças à colaboração, estímulo e empenho de diversas pessoas. Então gostaria de expressar toda a minha gratidão e apreço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta tarefa se tornasse uma realidade. A todos quero manifestar os meus sinceros agradecimentos, de uma forma especial:

- aos meus pais e irmãos, Silvia, Patricia e Sergio que de um modo ou outro me ajudaram durante a minha jornada;

- ao Prof. Farret, pelas orientações e conhecimentos passados durante o doutorado aprendemos muito como devemos ser dedicados,

- ao meu amigo Frank Gonzatti pelo conhecimento e apoio nos momentos mais difíceis;

- aos acadêmicos Diogo Franchi, Valesca Feltrin e Emerson, pela sua dedicação, apoio e contribuições no desenvolvimento desse trabalho;

- aos colegas de laboratório, Maicon Miotto, Fredi Ferigolo, Vinicius Kuhn, Luiz Manga; Lucas Ramos, Emanuel Vieira e Márcio Mansilha pelo apoio, contribuições e troca de ideias;

- aos servidores da PPGEE, Luciana e André, pelo empenho no desenvolvimento das suas atividades.

O bom combate é aquele que é travado
em nome de nossos sonhos.

(Paulo Coelho)

RESUMO

MONITORAMENTO REMOTO E SEGURO DO CAMPO MAGNÉTICO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO

AUTOR: Ciro José Egoavil Montero
ORIENTADOR: Felix Alberto Farret, PhD

O monitoramento dos níveis dos campos magnético e elétrico em linhas de transmissão de alta tensão (LT), usinas geradoras e subestações (SEs) são estabelecidos na Resolução da ANEEL 616/2014. Baseado nela, observou-se os procedimentos para realização das medições dos níveis de campos magnético e elétrico das SEs, assim como das LT e a necessidade de se dispor de procedimentos seguros para o monitoramento de forma contínua dos níveis gerados pelos equipamentos de potência. Este monitoramento deve ser realizado para que o registro dos níveis seja feito sem a necessidade de exposição da equipe escalada para executar os estudos da irradiação eletromagnética. Tais registros de níveis são feitos tanto no pátio onde ficam localizados os equipamentos e máquinas geradoras do sistema elétrico de potência como nos vãos das LT. A metodologia usada nesta tese para medir os níveis de campo magnético das LT de energia elétrica foi realizada através de um levantamento dos níveis eletromagnéticos em torno de uma LT e da compilação de um esquema supervisório. Simultaneamente, foi projetada uma antena especial para realizar a leitura do campo gerado, com a qual coletou-se os níveis eletromagnéticos seguindo um movimento que cobre a área monitorada. A antena foi posicionada a uma distância especificada pela área de segurança do trabalho e indicado pela norma vigente ABNT NBR25415. Os dados registrados foram adquiridos, processados, comparados e analisados de tal forma que se possa determinar as áreas com níveis mais intensos de irradiação, áreas com níveis aceitáveis e áreas seguras. Esta tese visa adquirir de forma remota os níveis da densidade dos fluxos magnéticos produzidos no em torno da LT, reduzindo os custos de implantação de pontos de monitoramento. Este estudo permite fornecer informações ao público ocupacional acerca dos níveis de irradiação existentes através do registro continuado dos níveis eletromagnéticos no vão da LT próximas das unidades geradoras e das instalações de SEs onde são encontrados os níveis mais elevados de campo magnético.

Palavras-chave: Campo Magnético. Monitoramento Contínuo. Monitoramento remoto. Linhas de Transmissão.

ABSTRACT

REMOTE AND SAFE MONITORING OF MAGNETIC FIELD IN HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES

AUTHOR: CIRO JOSÉ EGOAVIL MONTERO
ADVISOR: FELIX ALBERTO FARRET, PHD

Magnetic and electric field levels monitoring in overhead transmission lines (TL) of power plants and substations (SEs) has been established by Brazilian Resolution 616/2014. It was observed in procedures to carry out SEs magnetic and electric field levels measurements, that it is necessary to have a methodology that allows levels continuous monitoring generated by power equipment. This monitoring procedure must be carried out in such a way that levels recording will be accomplished without occupational public exposure that will perform electromagnetic irradiation studies in the courtyard where equipment and machines that generate electric power system are located. The methodology for measuring magnetic field levels of overhead TLs will be carried out through a sensors network, whose values will be transmitted to a supervisory scheme. Simultaneously, an antenna designed to read the generated field, will collect the levels following a movement that must cover TL monitored area. The antenna was positioned at a distance specified by work safety area. Recorded data were acquired, processed, compared and analyzed in such a way that areas with high irradiation levels, so forth areas with acceptable levels and safe areas could be determined. This thesis aims to acquire remotely magnetic flux density levels produced around the TL, reducing the implementing monitoring costs and providing information to occupational public of existing irradiation levels by continuous recording of electromagnetic levels in TL area near generating units and SE installations where magnetic field highest levels are found.

Keywords: Magnetic Field. Continuous Monitoring. Remote Monitoring. Transmission Lines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Domínio bidimensional Ω e representação das condições de contorno em um material possuindo condutividade σ e permissividade elétrica ϵ	42
Figura 3.2 - Modelo de borda aberta utilizado para o cálculo do campo magnético	43
Figura 4.1 - Elipse de polarização do campo elétrico em um ponto do espaço	50
Figura 4.2 - Convenção utilizada no cálculo dos coeficientes de potencial	53
Figura 4.3 - Convenção utilizada no cálculo do raio equivalente	54
Figura 4.4 - Determinação do campo através da Lei de Biot-Savart	56
Figura 4.5 - Geometria de uma linha de transmissão bifásica	58
Figura 4.6 - Condutor suspenso entre duas torres com a mesma altura.....	64
Figura 5.1 - Exemplo das malhas geradas no isolador mostrado em (a) através dos métodos de análise. Em (b) pelo método das diferenças finitas. Em (c) através dos elementos de fronteira e finalmente em (d) por meio de elementos finitos	68
Figura 5.2 - Elemento triangular a ser analisado	72
Figura 5.3 - Conexão dos elementos	74
Figura 6.1 - Diagrama de eventos desenvolvidos na metodologia	77
Figura 6.2 – Estrutura interna do protótipo medidor com vista explodida mostrando as 4 barras de ferro com as espiras no em torno	78
Figura 6.3 – Modelo do circuito aberto equivalente entre linhas pontilhadas da antena.....	80
Figura 6.4 - Representação do circuito de aquisição de dados a ser implementado para realizar a leitura da antena	81
Figura 6.5 - Circuito de condicionamento do sinal	82
Figura 6.6 – Esquema de conexão da bobina de Helmholtz	83
Figura 6.7 – Curvas obtidas com o levantamento da tensão para níveis de densidade de fluxo magnético entre 0 e 100 μ T	85
Figura 6.8 – Esquema de posicionamento do protótipo no ponto de monitoramento	86
Figura 6.9 - Posicionamento do protótipo frente a linha de transmissão de 13,8 kV apoiado sob uma base girante e realizando leituras em 0° (a), 30° (b), 45° (c) e, finalmente em 90° (d).....	87
Figura 7.1 - Níveis dos campos elétrico (linha vermelha) e magnético (linha preta) gerados dentro da faixa de servidão a uma altura de 1 m.....	89
Figura 7.2 - Níveis dos campos gerados para as linhas de transmissão de 69 kV e 230 kV	90
Figura 7.3 - Representação das superfícies equipotenciais dos campos elétrico (a) e magnético (b) gerados no em torno da Barra da subestação	91
Figura 7.4 - Diagrama 3D do campo magnético para uma linha de distribuição de 13,8 kV com uma corrente de 100 A.....	91
Figura 7.5 - Níveis do Campo Magnético para uma linha de 13,8 kV	92

Figura 7.6 – Detalhe interno da estrutura a ser montada com 4 barras e 50 espiras em cada barra, enroladas em sentidos de tal forma a somar as suas contribuições de campo gerado	93
Figura 7.7 – Diagrama de radiação do campo gerado pela estrutura. Em (a) a representação da diretividade e em (b) uma representação simbólica da intensidade do campo magnético gerado	94
Figura 7.8 - Posição do protótipo na proximidade da linha. Em (a) a posição inicial do protótipo, considerada perpendicular à linha de 13,8 kV. Em (b), o protótipo ficou posicionado a 30° da posição inicial girando no sentido horário.	95
Figura 7.9 - Posição da primeira marca no eixo de uma LT de 230 kV	98
Figura 7.10 - Posicionamento das marcas para medição da densidade de fluxo magnético da LT de 230 kV	98
Figura 7.11 - Protótipo posicionado pelo pesquisador na marca pré-estabelecida	99
Figura 7.12 – Interface dos blocos implementados no Simulink.....	100
Figura 7.13 – Resultados obtidos por meio dos métodos implementados.....	102
Figura 7.14 – Comparação entre o medidor e o protótipo	102
Figura B.1 – Bloco de cálculo das correntes.....	121
Figura B.2 – Bloco de cálculo do módulo do campo.....	122
Figura B.3 – Bloco de cálculo das componentes horizontais	123
Figura B.4 – Bloco de cálculo das componentes verticais.....	124
Figura B.5 – Bloco de condicionamento do sinal	124
Figura B.6 – Bloco de ajuste do sinal por aproximação	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Níveis de referência para os campos elétrico e magnético em instalações de 60 Hz	30
Tabela 1.2 - Níveis de referência para os campos elétrico e magnético em instalações de 60 Hz	31
Tabela 6.1 - Ganhos absolutos do circuito para diferentes níveis mensurados da densidade de fluxo magnético	82
Tabela 6.2 – Valores de tensão obtidos do protótipo no momento de ser exposto a níveis de densidade de fluxo magnético entre 0 e 100 μT	84
Tabela 7.1 - Leituras realizadas das 16:40 às 16:45	96
Tabela 7.2 - Leituras realizadas das 16:50 às 16:55	96
Tabela 7.3 - Leituras realizadas das 17:00 às 17:00	97
Tabela 7.4 - Leituras realizadas das 17:10 às 17:15	97
Tabela 7.5 -Comparativo entre os níveis obtidos através dos métodos utilizados e os valores obtido no protótipo.....	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAE	(do inglês: Computer Aided Engineering) engenharia auxiliada por computador
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
ELF	(do inglês: Extremely low-frequency) frequência extremamente baixa
LT	Linha de Transmissão
LD	Linha de Distribuição
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
NRs	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho
RN	Resolução Normativa
SE	Subestação de energia elétrica
MSC	Método da simulação de cargas/correntes
MEFESTQ	Método dos elementos finitos para aplicações estáticas implementadas com elementos triangulares quadráticos
PDEtool	Partial differential equation Matlab toolbox

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Densidade de fluxo magnético (T)
E	Intensidade de campo elétrico (V/m)
H	Campo Magnético (A/m)
B_x, B_y, B_z	Componente espacial do campo magnético (valor complexo)
E_x, E_y, E_z	Componente espacial do campo elétrico (valor complexo)
B	Valor eficaz do campo Magnético
E	Valor eficaz do campo Elétrico
B_x, B_y, B_z	Valor eficaz da componente espacial do campo magnético
E_x, E_y, E_z	Valor eficaz da componente espacial do campo elétrico
E_{Re}, E_{Im}	Componente real e imaginária do campo elétrico
B_{Re}, B_{Im}	Componente real e imaginária do campo magnético
E_{max}, E_{min}	Valor eficaz do semieixo maior e menor da elipse de polarização do campo elétrico
B_{max}, B_{min}	Valor eficaz do semieixo maior e menor da elipse de polarização do campo magnético
E_{pico-max}, E_{pico-min}	Valor de pico máximo e mínimo do campo elétrico (semieixo maior e menor da elipse de polarização do campo elétrico)
B_{pico-max}, B_{pico-min}	Valor de pico máximo e mínimo do campo magnético (semieixo maior e menor da elipse de polarização do campo magnético)
σ	Condutividade (S/m)
μ₀	Permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
ε₀	Permissividade elétrica do vácuo ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)

\mathbf{A}	Potencial magnético vetorial (Wb/m)
$i(t)$	Valor instantâneo da corrente (A)
V	Potencial Elétrico escalar (V)
$v(t)$	Valor instantâneo da tensão (v)
\dot{V}, \dot{I}	Indicação fasorial da tensão e corrente elétrica, respectivamente.
$\lambda(t)$	Valor instantâneo da densidade linear de carga (C/m)
\mathbf{u}	Vetor unitário
$\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z$	Vetores unitários na direção dos três eixos x, y, z

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	OBJETIVO GERAL.....	31
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	32
2	ESTADO DA ARTE.....	33
3	TEORIA ELETROMAGNÉTICA.....	37
3.1	CAMPOS HARMÔNICOS OU SENOIDAIS, VARIÁVEIS NO TEMPO.....	37
3.2	FUNÇÕES POTENCIAIS DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO	38
3.3	MODELAGEM ANALÍTICA DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS GERADOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	40
3.4	MODELAGEM NUMÉRICA DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS GERADOS EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	43
3.4.1	Método dos resíduos ponderados na forma fraca.....	44
3.4.2	Método de Galerkin	46
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
4	CAMPO ELETROMAGNÉTICO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO	49
4.1	CARACTERÍSTICAS DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO	49
4.2	VALOR EFICAZ DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO	51
4.3	MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO	51
4.4	CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO	52
4.5	CÁLCULO ANALÍTICO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO	55
4.6	EXEMPLO DE CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHA DE TRANSMISSÃO.....	58

4.7	CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO	61
4.8	EXEMPLO DE CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR LINHA DE TRANSMISSÃO	62
4.9	MAPEAMENTO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS	64
4.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
5	ANÁLISE DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO	67
5.1	MÉTODOS DE ANÁLISE DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO.....	67
5.2	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS	69
5.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	70
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
6	METODOLOGIA	77
6.1	IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DE MEDIÇÃO E RESULTADOS.....	78
6.2	CONDICIONAMENTO DO SINAL.....	81
6.3	IMPLEMENTAÇÃO DO CALIBRADOR	83
6.4	DESCRIÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	85
6.5	MEDIÇÕES DE CAMPO MAGNÉTICO.....	86
6.6	TESTES DE DIRETIVIDADE <i>IN LOCO</i>.....	87
6.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
7	SIMULAÇÕES E RESULTADOS FINAIS.....	89
7.1	SIMULAÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	89
7.2	SIMULAÇÕES DA ESTRUTURA IMPLEMENTADA.....	92
7.3	RESULTADOS.....	95
7.4	IMPLEMENTAÇÃO NO SIMULINK.....	99
7.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	100
7.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
8	CONCLUSÕES	105
8.1	DISCUSSÃO.....	106

8.2	CONTRIBUIÇÕES.....	106
8.3	TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICE A - TEORIA ELETROMAGNÉTICA.....	115
	A.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL	115
	APÊNDICE B - FERRAMENTA DE CÁLCULO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO	119

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento da tensão, corrente, temperatura e outros parâmetros das linhas de transmissão em tempo real realizado nas unidades de geração e distribuição de energia elétrica permitem avaliar a qualidade desta energia fornecida pelos sistemas interligados. Nos países com uma matriz energética consolidada ou em pleno crescimento, esses parâmetros são os indicadores para se avaliar a eficiência de uma rede inteligente ou *smart grid* (KHAWAJA et al., 2017).

Sabe-se que a proximidade de campos eletromagnéticos intensos pode ocasionar muitas alterações no corpo dos seres vivos (humanos, plantas e animais). A preocupação da comunidade científica sobre a exposição à campos magnéticos de ELF (frequência extremamente baixa) está presente em publicações sobre a possível causa de doenças como Alzheimer (JIA, 2015), efeitos biológicos através da alteração da homeostase intracelular do cálcio (CUI et al., 2014), mudanças na atividade neuronal (KOMAKI et al., 2014), perturbações na qualidade do sono (BARSAM et al., 2012), alterações no desenvolvimento do esqueleto em embriões de roedores, câncer, variabilidade da frequência cardíaca, alterações comportamentais como suicídio e depressão, hipersensibilidade, humor, e alterações cognitivas que foram compilados pela IARC *International Agency for Research on Cancer* (2002).

Entre os parâmetros das LTs, o campo eletromagnético tem sido apresentado com um equacionamento relativamente complexo, havendo uma constante procura por ferramentas computacionais para o seu processamento e análise em tempo real.

Os campos eletromagnéticos existentes no ambiente, além dos produzidos pela natureza, estão mais associados a equipamentos cujo funcionamento depende da energia elétrica, como é o caso dos motores e transmissão de informações (rádio, TV, comunicações e informática). Existe uma certa facilidade da população se aproximar a ditos equipamentos nos ambientes urbanos e, como consequência, ficar exposta as fontes dos campos eletromagnéticos.

Na maioria das áreas do profissional de engenharia elétrica encontram-se níveis de radiação que são regulamentados e devem ser monitorados continuamente, porque variam com o tempo e apresentam valores que podem ultrapassar a tolerância de exposição estabelecida pela Organização Mundial de Saúde - OMS.

Os níveis de irradiação dos campos elétrico e magnético que são gerados por equipamentos do sistema elétrico de potência podem exceder os limites permitidos de exposição como foi mencionado em diversas publicações (MUNTEANU et al., 2009); (CIGRE, 2009a, 2009b); (KRAJEWSKI, 2009); (LATTARULO, 2011); (LIU et al., 2002). Muitas das

áreas onde os profissionais (público operacional) do setor energético circulam (usinas, subestações e no em torno da linhas de transmissão) podem estar transgredindo as recomendações da Organização Mundial da Saúde – OMS (WHO, 2007).

A OMS utiliza como referência os estudos da Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante – ICNIRP. A Comissão publicou em (1998) as recomendações dos níveis máximos de exposição e em (2010) apresentou a atualização dos valores de referência considerando a frequência padrão de operação (60 Hz) para o território brasileiro.

Pode-se observar, que com o desenvolvimento econômico, as linhas de transmissão do sistema elétrico, que anteriormente eram encontradas percorrendo os ambientes rurais, agora passam ou passarão por locais considerados urbanos, onde os efeitos dos campos eletromagnéticos podem ser questionados.

Seguindo as recomendações da OMS, o Governo Federal do Brasil publicou em 2009 a Lei Federal 11.934 que estabelece as diretrizes relativas à exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. Segundo esta lei, cabe à ANEEL estabelecer as diretrizes e fazer a fiscalização dos níveis dos campos gerados pelas instalações do setor elétrico (BRASIL, 2009). Frente a esta situação, em 2010 a resolução normativa no. 398 da ANEEL regulamentou os procedimentos a serem seguidos pelas concessionárias, permissionárias e autorizadas do serviço público de energia elétrica quanto à medição dos campos elétrico e magnético (ANEEL, 2010), tendo estabelecido os níveis de referência para os campos variantes no tempo para as instalações em 60 Hz, como pode ser observado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Níveis de referência para os campos elétrico e magnético em instalações de 60 Hz

RN 398	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μT)
Público em Geral	4,17	83,33
População Ocupacional	8,33	416,67

Fonte: ANEEL (2010).

Cinco anos após a Lei Federal 11.934, em julho de (2014), a ANEEL atualizou os níveis de referência de radiações através da RN 616. Observa-se nela que o nível máximo de referência para o campo magnético é duas vezes maior para o público ocupacional, tal como apresentado na Tabela 1.2, extraído da RN 616.

Tabela 1.2 - Níveis de referência para os campos elétrico e magnético em instalações de 60 Hz

RN 616	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μT)
Público em Geral	4,17	200,00
População Ocupacional	8,33	1000,00

Fonte: ANEEL (2014).

A dinâmica dos níveis do campo eletromagnético próximas das linhas de transmissão depende de muitos parâmetros como: a configuração da seção transversal da linha de transmissão; o nível de tensão; corrente de carga e o efeito de desequilíbrios elétricos entre os equipamentos; tipo de condutor; a resistividade do solo; e o efeito de estruturas metálicas próximas as linhas de transmissão, tais como construções e tubulações (LIU et al., 2002). Assim sendo, o campo eletromagnético gerado pelas linhas de transmissão na área sob análise, deve ser estimado e simulado ainda na fase de projeto da linha transmissão, sendo que a intensidade desse campo não deve exceder os valores de referência (SILVA, 2010).

Também deve-se entender que medições esporádicas não irão detectar surtos do aumento de carga produzidos por grandes máquinas nem curtos-circuitos na rede. Note-se que os procedimentos oficiais indicam que as medições deverão ser feitas quando houver uma carga maior afetando o sistema elétrico de potência (ABNT, 2006). Por isso, o monitoramento contínuo dos níveis de campo eletromagnético pode oferecer o mecanismo necessário para se apontar para os estudos a serem seguidos e o desenvolvimento de tecnologias para o mercado brasileiro, disponibilizando-se dados para que as concessionárias e permissionárias não transpassem os níveis máximos permitidos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Propor um procedimento para os monitoramentos contínuo e remoto da irradiação de campo eletromagnético em ambientes onde são gerados altos níveis de tensão, mais especificamente nas proximidades das linhas de transmissão de alta tensão.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os métodos de medição de campo eletromagnético no em torno das linhas de transmissão de alta tensão;

- Propor um método e o instrumental necessário para os monitoramentos contínuo e remoto de campos magnéticos;
- Estabelecer critérios para selecionar a melhor técnica de análise do campo magnético;
- Implementar um sistema de monitoramento contínuo e remoto de uma linha de transmissão de alta tensão.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A temática desenvolvida nesta tese apresenta a seguinte estrutura: o Capítulo 1 apresenta uma breve introdução aos assuntos abordados neste texto. O Capítulo 2 descreve o estado da arte para monitoramento de campos eletromagnéticos. No Capítulo 3 faz-se uma revisão sobre a teoria eletromagnética. O Capítulo 4 apresenta uma revisão dos métodos utilizados para analisar os níveis de campo eletromagnético nas linhas de transmissão. No Capítulo 5 é feita uma discussão sobre os métodos utilizados atualmente para analisar os campos eletromagnéticos nas linhas de transmissão. O Capítulo 6 introduz a metodologia proposta nesta tese. O Capítulo 7 apresenta os resultados da simulação de campos nos equipamentos encontrados em subestações e linhas de transmissão com dados experimentais. Finalmente, o Capítulo 8 reúne as conclusões, os pontos mais originais e as contribuições esperada da tese.

2 ESTADO DA ARTE

Os limites de exposição aos campos eletromagnéticos gerados em torno de equipamentos elétricos foram definidos pela comunidade internacional através de publicações que visam manter a população e o público ocupacional resguardados dos níveis de irradiação que possam prejudicar a saúde humana.

A comunidade europeia foi contemplada com duas publicações. A mais importante delas, a 2004/20/EC EU Directive (EU, 2004) refere-se aos requerimentos mínimos de saúde e de exposição a campos eletromagnéticos. O segundo documento é o 1999/519/EC EU *Council Recommendation on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields* (EU, 1999).

Na literatura especializada, o monitoramento contínuo dos equipamentos de potência associados à geração, transmissão e distribuição de energia, tem-se concentrado apenas nas linhas de transmissão. Verifica-se que os pesquisadores estão mais focados em estratégias para manter o sistema funcionando e na forma de levar energia para o consumidor em condições seguras e confiáveis.

A literatura técnica relativa às irradiações eletromagnéticas descreve aspectos tais como os que incluem a temperatura da linha, queda na linha, congelamento, balanço, corrosão do núcleo, rompimento da linha, efeito corona, ruído audível, entre outras variáveis (BEGOVIC, 2004; OLSEN; EDWARDS, 2002; SAVADJIEV; FARZANEH, 2004; SEPPA, 1993). Na realidade, não existe essencialmente um monitoramento em tempo real das linhas de transmissão. Os procedimentos desenvolvidos, para conferir a segurança e mantê-las operacionais, utilizam apenas helicópteros ou veículos de transporte terrestre para inspeção das linhas. Estes mecanismos de inspeção resultam em custos elevados e normalmente apresentam falhas na identificação dos problemas em andamento ou falhas na localização dos pontos, o que demanda tempo na identificação e solução do problema (GUO; HAYAT; WANG, 2011).

Pelas razões apresentadas acima, a segurança da rede de transmissão tem sido um dos pontos mais importantes para a expansão da matriz energética, gerando como resultado a construção de sistemas de monitoramento para a manutenção das linhas de transmissão (SAWADA et al., 1991; TOUSSAINT; POULIOT; MONTAMBAULT, 2009; ZHU et al., 2009; ZHU; JUDD; MOORE, 2009).

Há poucos trabalhos na literatura especializada relativos ao monitoramento da irradiação do campo eletromagnético em linhas de transmissão de alta tensão. Os relatórios de medição foram realizados ao longo de curtos períodos de tempo, e os dados foram acessados e

processados em momentos posteriores. Feldman e colaboradores (1992) utilizaram os modelos de elementos finitos para selecionar as melhores posições para localizar o sensor de campo elétrico para estimar o potencial de uma cabeceira de linha.

Feser e colaboradores (1988) usaram um sensor de campo elétrico de quatro quadrantes para mensurar as tensões de impulso. Wiggins e Wright (1991) mensuraram os campos irradiantes ao nível da terra produzidos em uma subestação pelas operações de comutação.

Gerrard e Gibson (1996) apresentam os primeiros resultados sobre monitoramento remoto das condições das linhas de transmissão e comparam o desempenho do modelo de elementos finitos.

Em 2009, Safigianni e colaboradores realizaram medições em uma subestação (SE) de 2x50 MVA, 150/20 kV com 3 medições em 300 pontos e plotaram a distribuição de campo magnético (CM) (SAFIGIANNI; TSOMPANIDOU, 2009). Levantaram dados a diferentes alturas e a cada 6 m na área do barramento, 2 m na área dos capacitores e seccionadora e a cada 1 m na sala de controle. Mensuraram correntes e fluxo magnético em uma única posição da SE a uma periodicidade de 15 min durante 24 h, verificando que existia uma relação linear entre ambas as grandezas. Assim, os autores determinaram que o maior nível de CM estava localizado na seção do banco de capacitores.

Zangl e colaboradores preocuparam-se com os níveis de campo elétrico gerado pelas linhas aéreas de transmissão de alta tensão, e apresentaram um estudo de viabilidade para a leitura contínua com equipamentos conectados nas linhas de transmissão (ZANGL; BRETTERKLIEBER; BRASSEUR, 2009). Todavia, o problema sobre monitoramento do ponto de vista tecnológico é o ruído gerado pelas linhas de transmissão. Assim sendo, em 2010, Huertas e colaboradores apresentaram um estudo sobre o ruído eletromagnético gerado pelas linhas de transmissão de 400 kV, para avaliar os sistemas de telecomunicações quando operados dentro do campo eletromagnético gerado pela linha analisada pelos pesquisadores (HUERTAS; BARRAZA; ECHEVERRY, 2010).

Munteanu e sua equipe (2010) realizaram o primeiro estudo sistemático em subestações de alta (110/20/10 kV com 363 pontos de teste) e extra-alta tensão (400/220 kV com 3.000 pontos de teste) seguindo a “Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004” (EU, 2004). Mapearam a distribuição dos campos elétrico e magnético na SE usando uma formulação analítica do campo para aproximar a sua distribuição (MUNTEANU; VISAN; POP, 2010). As medições não seguem a norma brasileira e usaram um cabo de fibra ótica num medidor conectado a um dispositivo de controle localizado a 3 m de

distância. Munteanu não realizou medições em linhas de transmissão próximas das subestações e as suas leituras apresentaram um erro de 15% entre o cálculo teórico e as medições realizadas.

Markoski e colaboradores apresentaram a implementação de um sistema em três eixos para monitoramento do campo magnético gerado pelas linhas de transmissão, mas com o intuito de desenvolver um equipamento compacto para medidas em um único ponto (MARKOVSKI et al., 2011).

Vilacha e colaboradores (2012) calcularam o campo magnético nas vizinhanças dos equipamentos de transmissão e distribuição de energia elétrica baseados na modelagem do sistema de condutores com um circuito elétrico dependente da frequência. O circuito consiste de elementos resistivos, indutivos e capacitivos que são calculados usando as equações básicas do eletromagnetismo. A análise do circuito usa técnicas convencionais que permitem obter correntes e tensões em todos os condutores. Assim, o campo magnético na vizinhança das linhas e SEs pode ser computado pela superposição das contribuições individuais das correntes dos condutores em cada ponto, porém com a altura de medição fora da norma brasileira.

Roscoe e Judd 2013 (2013) desenvolvem um protótipo que aproveita a energia proveniente do campo magnético gerado em locais de difícil acesso ou em locais remotos, apresentando o modelo do sensor utilizado. No mesmo ano, Sun e colaboradores (2013) apresentaram uma técnica para monitorar o estado das linhas de transmissão de 220 kV e 500 kV. O grupo utilizou um conjunto de sensores magneto-resistivos espalhados no eixo existente entre duas torres. Observa-se que o trabalho se concentrou em determinar a flecha e balanço da LT.

Finalmente, Khawaja e colaboradores (2017) apresentaram um arranjo de sensores para monitorar a flecha e o balanço das linhas de transmissão, mas posicionando o conjunto na torre que sustenta as linhas.

3 TEORIA ELETROMAGNÉTICA

Os aspectos da teoria eletromagnética apresentados neste capítulo estão concentrados nos aspectos de cargas com movimento descontínuo ou corrente variável no tempo que consistem basicamente nas equações de Maxwell. As equações são estudadas através de sua forma diferencial ou integral que podem ser revisadas no Apêndice A. Essas relações definem as leis fundamentais do eletromagnetismo nas quais se baseia a análise dos sistemas elétricos e fenômenos eletromagnéticos associados e aqui são dadas em exemplos de referência.

3.1 CAMPOS HARMÔNICOS OU SENOIDAIS, VARIÁVEIS NO TEMPO

Na engenharia elétrica é importante conhecer o comportamento dos dispositivos excitados senoidalmente. Assim, é conveniente representar as variáveis envolvidas nos cálculos na forma fasorial complexa.

Os campos produzidos por cargas e correntes cuja variação com o tempo é simplesmente harmônica ou senoidal são chamados de campos harmônicos (SADIKU, 2004). Considerando que a fonte varia no tempo como:

$$v(t) = V_{max} \cos(\omega t + \alpha) \quad (3.1)$$

Então, $v(t)$ pode ser representado por:

$$v(t) = \text{Re}[V_{max} e^{j(\omega t + \alpha)}]$$

$$v(t) = \text{Re}[V_{max} e^{j\omega t} e^{j\alpha}]$$

$$v(t) = \text{Re}[\dot{V} e^{j\omega t}] \quad (3.2)$$

onde $j = \sqrt{-1}$, a expressão $\text{Re}(z)$ define a parte real de z e $\dot{V} = V_{max} e^{j\alpha}$ representa um vetor no campo complexo e é função somente das coordenadas espaciais.

Como o fator tempo $e^{j\omega t}$ é um multiplicador comum, todas as derivadas no tempo $\frac{\partial}{\partial t}$ podem ser substituídas por $j\omega$, assim as equações de Maxwell (A.1) e (A.2) são reescritas como:

$$\nabla \times \dot{\mathbf{E}} + j\omega \dot{\mathbf{B}} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}} - j\omega \dot{\mathbf{D}} = \dot{\mathbf{j}} \quad (3.4)$$

A equação da continuidade, definida em (A.9), é reescrita como:

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{j}} + j\omega \rho = 0 \quad (3.5)$$

Para os campos harmônicos existentes em um meio linear, isotrópico e homogêneo, a forma fasorial complexa das equações (A.1) e (A.2) são definidas como:

$$\nabla \times \dot{\mathbf{E}} + j\omega \mu \dot{\mathbf{H}} = 0 \quad (3.6)$$

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}} - j\omega \epsilon \dot{\mathbf{E}} = \dot{\mathbf{j}} \quad (3.7)$$

3.2 FUNÇÕES POTENCIAIS DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO

O vetor potencial $\dot{\mathbf{A}}(r, t)$ é definido por uma função vetorial fasorial complexa na qual os campos eletromagnéticos fatoriais complexos $\dot{\mathbf{E}}$ e $\dot{\mathbf{B}}$ estão relacionados por:

$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times \dot{\mathbf{A}} \quad (3.8)$$

Substituindo a equação (3.8) na equação (A.4) e substituindo esse resultado na (A.1), obtém-se (3.9):

$$\nabla \times \left(\dot{\mathbf{E}} + \frac{\partial \dot{\mathbf{A}}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.9)$$

A existência de $\dot{\mathbf{A}}$ determina completamente $\dot{\mathbf{B}}$ na (3.8), mas a recíproca não é verdadeira visto que o rotacional do gradiente de qualquer escalar se anula, ou seja, $\nabla \times (\nabla V) = 0$. Assim, se \dot{V} é uma função potencial escalar fasorial complexa qualquer, tem-se que:

$$\dot{\mathbf{E}} + \frac{\partial \dot{\mathbf{A}}}{\partial t} = -\nabla \dot{V} \quad (3.10)$$

e conseqüentemente:

$$\dot{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \dot{\mathbf{A}}}{\partial t} - \nabla \dot{V} \quad (3.11)$$

Substituindo em (A.6) e (A.5) na segunda equação de Maxwell definida em (A.2) consideradas na forma fasorial complexa, resulta em:

$$\nabla \times \dot{\mathbf{B}} - \mu \epsilon \frac{\partial \dot{\mathbf{E}}}{\partial t} = \mu \dot{\mathbf{J}} \quad (3.12)$$

Substituindo as equações (3.8) e (3.10) na (3.12), obtém-se (3.13):

$$\nabla \times \nabla \times \dot{\mathbf{A}} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{A}}}{\partial t^2} + \mu \epsilon \nabla \left(\frac{\partial \dot{V}}{\partial t} \right) = \mu \dot{\mathbf{J}} \quad (3.13)$$

Substituindo a seguinte identidade vetorial:

$$\nabla \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \nabla (\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}}) - \nabla^2 \dot{\mathbf{A}} \quad (3.14)$$

em (3.13), resulta em (3.15):

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{A}}}{\partial t^2} - \nabla \left(\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}} + \mu \epsilon \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} \right) = -\mu \dot{\mathbf{J}} \quad (3.15)$$

Substituindo (A.5) na equação (A.3) e considerando a densidade linear de carga complexa tem-se:

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{E}} = \frac{\dot{\rho}}{\epsilon} \quad (3.16)$$

A (3.11) é agora inserida na equação (3.16), resultando:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{\partial \dot{\mathbf{A}}}{\partial t} - \nabla \dot{V} \right) = \frac{\dot{\rho}}{\epsilon} \quad (3.17)$$

Isto conseqüentemente leva a:

$$\nabla^2 \dot{V} + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \dot{\mathbf{A}} = -\frac{\dot{\rho}}{\epsilon} \quad (3.18)$$

Um campo vetorial é univocamente definido quando seu rotacional e sua divergência são especificados. O rotacional do potencial magnético ($\dot{\mathbf{A}}$) foi especificado em (3.8), assim uma relação entre os potenciais $\dot{\mathbf{A}}$ e \dot{V} deve ser verificada, o que é estabelecido pela condição de Lorentz, apresentada a seguir:

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}} = -\mu\epsilon \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} \quad (3.19)$$

Assim, as expressões (3.15) e (3.18) podem ser reescritas em função do vetor potencial magnético fasorial complexo $\dot{\mathbf{A}}$ e do potencial escalar elétrico fasorial complexo \dot{V} , respectivamente:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{A}}}{\partial t^2} = -\mu\mathbf{j} \quad (3.20)$$

$$\nabla^2 \dot{V} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \dot{V}}{\partial t^2} = -\frac{\dot{\rho}}{\epsilon} \quad (3.21)$$

Os termos (3.20) e (3.21) são definidos como equações de onda não homogêneas.

3.3 MODELAGEM ANALÍTICA DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS GERADOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os campos elétricos e magnéticos gerados em linhas de transmissão são caracterizados como um fenômeno eletromagnético quase estático e considerados desacoplados na frequência de 60 Hz (OLSEN; WONG, 1992). Isto quer dizer que são completamente independentes entre si.

Considerando que não há variação temporal do campo magnético, a sua derivada é nula ($\frac{\partial B}{\partial t} = 0$) (BASTOS, 2012), logo tem-se o caso particular da magnetostática. Assim, no cálculo do campo elétrico de linhas de transmissão em alta tensão a (3.11) passa a ser definida como:

$$\dot{\mathbf{E}} = -\nabla\dot{\mathbf{V}} \quad (3.22)$$

Com essas restrições aplicadas em (A.1) obtém-se:

$$\nabla \times \dot{\mathbf{E}} = 0 \quad (3.23)$$

Considerando os campos desacoplados, (3.20) e (3.21) são reescritas como:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} = -\mu \dot{\mathbf{j}} \quad (3.24)$$

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{V}} = -\frac{\dot{\rho}}{\epsilon} \quad (3.25)$$

A (3.24) é chamada de equação de Poisson da magnetostática e a (3.25) de Poisson da eletrostática, onde $\dot{\rho}$ é a densidade de carga linear complexa e ϵ é a constante de permissividade do meio.

A equação de Laplace é definida para $\dot{\rho} = 0$ como:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{V}} = 0 \quad (3.26)$$

Aplicando o divergente em (3.4), obtém-se (3.27)

$$\nabla \cdot (\dot{\mathbf{j}} + j\omega \dot{\mathbf{D}}) = 0 \quad (3.27)$$

Substituindo as relações constitutivas dadas em (A.5) e (A.7) e considerando o potencial escalar complexo, resulta em (3.28).

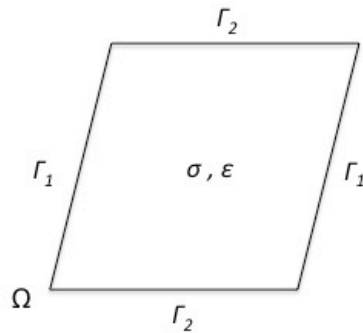
$$\nabla \cdot \left[\sigma \nabla \dot{\mathbf{V}} e^{j\omega t} + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \nabla \dot{\mathbf{V}} e^{j\omega t}) \right] = 0 \quad (3.28)$$

Como $e^{j\omega t}$ não varia com as coordenadas do domínio e ϵ não varia com o tempo, tem-se:

$$\nabla \cdot [(\sigma + j\omega\epsilon) \nabla \dot{\mathbf{V}}] = 0 \quad (3.29)$$

A (3.29) descreve o comportamento do potencial elétrico escalar complexo nos pontos do domínio Ω , representados na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Domínio bidimensional Ω e representação das condições de contorno em um material possuindo condutividade σ e permissividade elétrica ϵ



Fonte: Modificado de (PINHO, 1994)

Para resolver a equação (3.28), as condições de contorno Γ devem ser especificadas e são classificadas como (PINHO, 1994):

1. Condição de contorno de Dirichlet, onde o potencial é imposto:

$$\dot{V} = V_0 \text{ em } \Gamma_1 \quad (3.30)$$

2. Condição de contorno de Neumann:

$$-\frac{\partial \dot{V}}{\partial n} = 0 \text{ em } \Gamma_2 \quad (3.31)$$

Nesse caso, Γ_1 representa a parcela de Γ onde são especificadas as condições de contorno de Dirichlet e Γ_2 representa a parcela de Γ onde são especificadas as condições de contorno de Neumann, com:

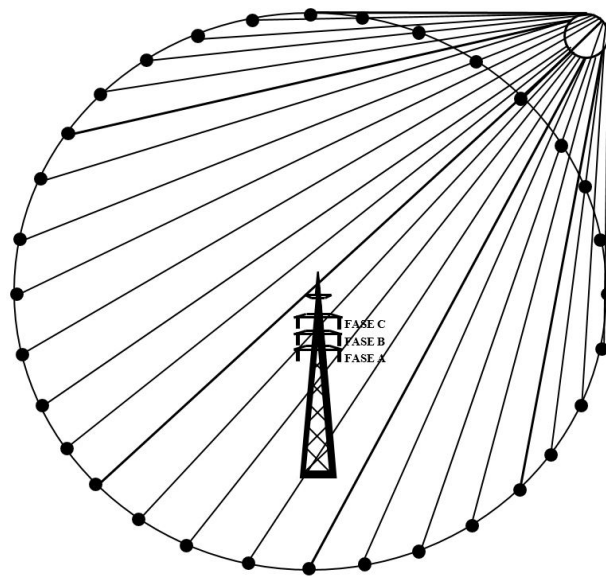
$$\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \quad (3.32)$$

e

$$\Gamma_1 \cap \Gamma_2 = \emptyset \quad (3.33)$$

Na Figura 3.2 é mostrado o modelo para o cálculo do campo magnético, onde é considerado que o solo e o ar no em torno da torre possuem propriedades magnéticas similares. Ao aplicar um potencial fixo no em torno da borda circular, para as condições de Dirichlet, interpreta-se que o campo é forçado a ser zero a uma determinada distância. Evita-se dessa forma a discretização de um elevado número de elementos fora do domínio de interesse. Os limites abertos são aplicados usando um segundo modelo e conectando-o com o primeiro modelo por restrições binárias. O potencial é forçado a ser igual entre um nó do limite do primeiro modelo e o nó correspondente no limite do segundo modelo. Isso garante que o potencial em distância infinita do domínio seja zero (HAMEYER, K., MERTENS, R., BELMANS, 1995).

Figura 3.2 - Modelo de borda aberta utilizado para o cálculo do campo magnético



Fonte: Modificado de (HAMEYER, K., MERTENS, R., BELMANS, 1995).

3.4 MODELAGEM NUMÉRICA DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS GERADOS EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

O método dos elementos finitos é fundamentado no método de resíduos ponderados com emprego do método de Galerkin.

3.4.1 Método dos resíduos ponderados na forma fraca

A solução analítica de (3.29) é chamada de solução exata \dot{V} para o potencial escalar elétrico complexo. Devido à dificuldade apresentada na solução desse tipo de equação diferencial parcial em relação às condições de contorno que devem ser adotadas, uma solução numérica é procurada que é chamada de solução aproximada \dot{V}' . Quando funções de ponderação são inseridas numa equação diferencial parcial, são produzidos resíduos. Para $(\sigma + j\omega\epsilon) = C$, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[C \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[C \frac{\partial \dot{V}'}{\partial y} \right] = R \quad (3.34)$$

No Método de Resíduos Ponderados, o resíduo R é anulado por meio da seguinte operação (IDA; BASTOS, 1997):

$$\iint_{\Omega^e} w \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[C \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[C \frac{\partial \dot{V}'}{\partial y} \right] \right\} d\Omega = 0 \quad (3.35)$$

onde w é a chamada função de ponderação e Ω^e representa o domínio do elemento finito onde essa condição foi imposta.

A função de ponderação w é escolhida numa classe de funções de teste, de modo que sejam nulas no contorno Γ_1 .

Da seguinte propriedade da divergência de um campo vetorial, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(wC \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right) = C \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} + w \frac{\partial}{\partial x} \left(C \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right)$$

Esta equação pode ser reescrita como:

$$w \frac{\partial}{\partial x} \left(C \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(wC \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right) - C \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \quad (3.36)$$

Integrando sobre a superfície fechada Ω^e que define o elemento finito, obtém-se:

$$\iint_{\Omega^e} \left[w \frac{\partial}{\partial x} \left(c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right) \right] d\Omega = \iint_{\Omega^e} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(w c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right) \right] d\Omega - \iint_{\Omega^e} \left[c \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right] d\Omega \quad (3.37)$$

Aplicando o teorema da divergência ao primeiro termo, do lado direito, de (3.37), resulta em:

$$\iint_{\Omega^e} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(w c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right) \right] d\Omega = \oint_{\Gamma_{\Omega^e}} w \left(c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right) \cdot \mathbf{n} d\Gamma \quad (3.38)$$

onde Γ_{Ω^e} representa o contorno da superfície fechada que define o domínio Ω^e .

Considerando o desenvolvimento de (3.38), (3.37) e (3.36) em (3.35), resulta em (3.39)

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega^e} w \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial y} \right] \right\} d\Omega = \\ = \oint_{\Gamma_{\Omega^e}} w \left(c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} + c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial y} \right) \cdot \mathbf{n} d\Gamma - \iint_{\Omega^e} \left[c \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} + c \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \dot{V}'}{\partial y} \right] d\Omega \end{aligned} \quad (3.39)$$

O primeiro termo no lado direito de (3.39) caracteriza as condições de contorno do problema. Visto que a equação (3.35) é igual à zero, o lado direito de (3.39) também deverá ser nulo, ou seja:

$$\oint_{\Gamma_{\Omega^e}} w \left(c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} + c \frac{\partial \dot{V}'}{\partial y} \right) \cdot \mathbf{n} d\Gamma - \iint_{\Omega^e} \left[c \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} + c \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \dot{V}'}{\partial y} \right] d\Omega = 0 \quad (3.40)$$

onde Γ_{Ω^e} é a fronteira do domínio Ω^e e n é o vetor unitário normal à fronteira do elemento finito.

Aplicando a condição de contorno de Neumann, definida pela (3.31) na parcela Γ_2 e considerando $w = 0$ na parcela Γ_1 da fronteira, o primeiro termo do lado esquerdo da (3.40) é anulado. Assim, a forma fraca para o problema é definida como:

$$\iint_{\Omega^e} \left[C \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \dot{V}'}{\partial x} + C \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \dot{V}'}{\partial y} \right] d\Omega = 0 \quad (3.41)$$

A (3.41) é chamada de formulação na forma fraca, porque em relação à (3.34), a ordem de derivação foi reduzida em um grau.

3.4.2 Método de Galerkin

O método de Galerkin busca uma solução para a (3.41) considerando as condições de contorno definidas por (3.30) e (3.31) por meio de funções de teste que em princípio satisfazem essas condições de contorno.

A função \dot{V}' pertence a uma classe de funções admissíveis de dimensão infinita, cuja primeira derivada tenha seu quadrado integrável e $\dot{V}' = V_0$, em Γ_1 . A função do teste w pertence a uma classe de funções de dimensão infinita H_0 com sua primeira derivada com quadrado integrável e que se anulam em Γ_1 . A função w e a solução \dot{V}' são linearmente independentes e pertencem a classes de funções de dimensão infinita, conseqüentemente a procura da solução é extremamente difícil (PINHO, 1994). A seguir, são definidas duas classes de funções:

a) Funções admissíveis:

$$H = \{w: w \in H_1(\Omega); w = \dot{V}' \text{ em } \Gamma_1\} \quad (3.42)$$

b) Funções de teste:

$$H = \{w: w \in H_1(\Omega); w = 0 \text{ em } \Gamma_1\} \quad (3.43)$$

onde $H_1(\Omega)$ é o espaço de Sobolev de primeira ordem, ou seja, o espaço das funções suficientemente regulares de forma que suas primeiras derivadas tenham seu quadrado integrável sobre Ω .

O método de Galerkin procura uma solução aproximada para a (3.41) em uma classe de dimensão finita (PINHO, 1994). Assim, utilizando um número limitado, N , de termos linearmente independentes, obtém-se uma aproximação \dot{V}' para \dot{V}' definida como:

$$\dot{V}' = \sum_{i=1}^N \dot{V}'_e w_i \quad (3.44)$$

onde w_i é a função de base ou função de interpolação, também conhecida como função de forma, constituída pelo polinômio de Lagrange, associado ao nó i , \dot{V}'_e representa os potenciais desconhecidos e N é a dimensão do espaço.

Uma das grandes vantagens do método dos elementos finitos vem do fato de que a formulação numérica da modelagem é feita diretamente a partir da equação que define o fenômeno físico tratado, ao invés de se utilizar um funcional como é feito em métodos variacionais (PINHO, 1994).

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as equações que são aplicadas para as ondas senoidais na forma fasorial juntamente com a aproximação das equações quando a frequência de operação é baixa, a modelagem fundamental das linhas de transmissão e suas condições de contorno. São também apresentados os métodos que subsidiam a técnica de elementos finitos para modelar numericamente o campo eletromagnético.

4 CAMPO ELETROMAGNÉTICO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

Nesse capítulo são fornecidos os elementos fundamentais para o cálculo dos campos elétrico e magnético gerados por linhas de transmissão de alta tensão pelo método de simulação de cargas (MSC). O método é baseado na teoria de imagens que estabelece que uma configuração de cargas próximas ao plano infinito de condutor perfeito aterrado pode ser substituída pela própria configuração de cargas, por sua imagem e por uma superfície equipotencial no lugar do plano condutor (SADIKU, 2004)

As instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica são fontes de campos elétricos e magnéticos de alta intensidade. Na frequência industrial de 60 Hz, estes campos são considerados desacoplados (OLSEN, 1992). A diferença de potencial entre os condutores é responsável pelo campo elétrico e o campo magnético está associado à corrente elétrica que percorre os cabos, sendo que a intensidade de tais campos decai fortemente à medida que se afastam das fontes (SKILLING, 1947; SILVA, 2010).

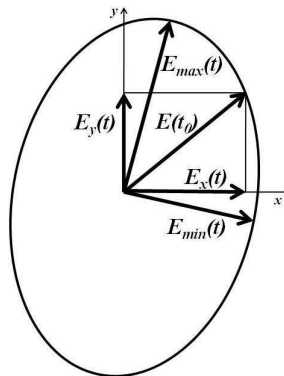
4.1 CARACTERÍSTICAS DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO

O campo elétrico E gerado nas proximidades de um condutor submetido a tensão é um vetor cuja intensidade representa a força exercida pelo campo sobre uma carga unitária, e é dado em volts por metro (V/m).

No caso do campo alternado senoidal gerado por uma fonte monofásica, o vetor campo elétrico oscila ao longo de um eixo fixo. No caso de uma fonte polifásica, o vetor campo elétrico gira sobre um plano descrevendo uma elipse. Em regime senoidal, as amplitudes dos campos elétricos e magnéticos variam ciclicamente na mesma frequência das tensões e correntes que geram estes campos elétricos e magnéticos, respectivamente.

Na presença de mais fontes, como no caso dos condutores de uma linha trifásica, os três componentes espaciais dos campos não estão em fase, de modo que o vetor resultante assume, a cada instante, diferentes intensidades e direções. Graficamente, isso é representado por um vetor que gira em torno do seu ponto de aplicação descrevendo com a outra extremidade uma elipse, como representado na Figura 4.1. Tem-se, portanto, um campo polarizado elipticamente, onde o plano formado pela a elipse é definido como um plano de polarização do campo (DENO, 1976). Entretanto, nota-se que o campo elétrico é sempre perpendicular à superfície do condutor (equipotencialidade). Isto acontece em especial para a terra que, para fins eletrostáticos, pode ser considerada como um elemento condutor e também para organismos vivos.

Figura 4.1 - Elipse de polarização do campo elétrico em um ponto do espaço



Fonte: Autor.

O campo elétrico em cada ponto do espaço é um vetor dependente do tempo e descrito mediante sua componente espacial ao longo de três eixos ortogonais:

$$E = E_x \cdot u_x + E_y \cdot u_y + E_z \cdot u_z \quad (4.1)$$

Para um campo alternado senoidal, a componente espacial pode ser representada por um número complexo ou por um fasor. Considerando que o campo elétrico na vizinhança de um objeto condutor (inclusive pessoas) é geralmente influenciado por tal objeto, para caracterizar-se a condição de exposição utiliza-se o valor do campo elétrico sem distorção, que é o valor do campo que existiria na ausência de objetos ou pessoas (DENO, 1976).

O campo magnético \mathbf{H} é uma grandeza vetorial. Como no caso do campo elétrico, devido à uma fonte senoidal, esse vetor oscila ao longo de um eixo fixo (fonte monofásica) ou gira sobre um plano descrevendo uma elipse (fonte polifásica). A intensidade do campo magnético é dada em ampère por metro (A/m).

O campo magnético é dado em termos da densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , grandeza também conhecida como indução magnética. A densidade de fluxo magnético é definida em termos da força exercida sobre uma carga em movimento no campo. Essa grandeza tem como unidade de medida o tesla (T), sendo que 1 tesla equivale a 1 weber por metro quadrado (Wb/m^2), equivalente a um volt segundo por metro quadrado (Vs/m^2). A densidade de fluxo magnético está relacionada com o campo magnético pela relação constitutiva mostrada abaixo:

$$B = \mu H \quad (4.2)$$

onde:

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_r \cdot \mu_0 && \text{é a permeabilidade do meio;} \\ \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} && \text{H/m é a permeabilidade absoluta no vácuo e;} \\ \mu_r &&& \text{é a permeabilidade relativa, que nesse caso vale 1.} \end{aligned}$$

A densidade de fluxo magnético também pode ser representada empregando componentes espaciais ao longo de três eixos mutuamente ortogonais, como:

$$B = B_x \cdot u_x + B_y \cdot u_y + B_z \cdot u_z \quad (4.3)$$

No caso do campo alternado senoidal, cada componente espacial pode ser representada mediante um fasor (DENO, 1976).

4.2 VALOR EFICAZ DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO

O valor eficaz F de uma grandeza periódica $F(t)$ é definido como:

$$F_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T F^2(t) \cdot dt} \quad (4.4)$$

O valor eficaz de um campo polarizado elipticamente é calculado por meio da raiz quadrada da soma do quadrado dos valores eficazes das três componentes. Por exemplo, para o campo elétrico é definido como (4.5), que é o valor eficaz do campo elétrico calculado no ponto de interesse.

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (4.5)$$

4.3 MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO

No cálculo do campo elétrico (E) e da densidade de fluxo magnético B da linha de transmissão considera-se que os condutores das fases e cabos para-raios estão paralelos entre si e são de comprimento infinito, e o solo é considerado como sendo um plano de extensão infinita. Nesse caso, considera-se a tensão e a corrente simétricas e equilibradas, situação geralmente

observada em linhas de alta tensão. Esse modelo também se aplica a sistemas assimétricos e desequilibrados. Além disso, essa modelagem permite o cálculo dos campos elétrico e magnético em qualquer seção transversal da linha, considerando a altura real do condutor na seção analisada (DENO, 1976; EPRI, 1982).

Também é possível considerar que o condutor da linha forma uma catenária. Nesse caso, os cálculos são realizados em relação à menor altura da linha, ou seja, no vértice da catenária. A aproximação permanece aceitável, com erros menores que 10%, mesmo que os cálculos sejam realizados nas proximidades do ponto de suspensão do condutor (DENO, 1976).

4.4 CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO

O método de cálculo utilizado nesta tese para a medição dos campos eletromagnéticos em torno de uma linha de transmissão é a simulação simplificada de cargas ou cargas equivalentes. Nesse caso, não há interesse em se saber a distribuição exata de cargas sobre a superfície dos condutores. Portanto, considera-se uma densidade linear de carga constante. Na determinação da carga presente sobre os diversos condutores da linha emprega-se o método das imagens, no qual um plano equipotencial de potencial nulo, nesse caso representado pelo solo, pode ser simulado com uma configuração de cargas imagem, ou seja, de cargas com sinal oposto ao das cargas que geraram o campo. Desse modo, são especificados os potenciais $v(t)$ em um sistema de condutores paralelos entre si tornando possível calcular a carga linear induzida sobre os condutores pela seguinte expressão (DENO; ZAFFANELLA, 1982; FUCHS, 1977):

$$[\lambda(t)] = [C] \cdot [v(t)] \quad (4.6)$$

onde:

$[v(t)]$ o vetor coluna dos potenciais;

$[\lambda(t)]$ é o vetor coluna da densidade linear de carga nos condutores;

$[C]$ matriz quadrada das capacitâncias parciais por unidade de comprimento.

Reescrevendo a (4.6) em termos de fasores, tem-se:

$$[\dot{\lambda}] = [\dot{C}] \cdot [\dot{V}] \quad (4.7)$$

A matriz $[C]$ é constante, simétrica e dependente da configuração geométrica dos condutores. Essa matriz é obtida pela inversão da matriz de potenciais ou a chamada matriz de

coeficientes de Maxwell [P], a qual expressa cada potencial em função da densidade linear da carga total. Os elementos da matriz [P] são definidos como (FUCHS, 1977):

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2y_i}{r_i} \quad \text{para os potenciais próprios} \quad (4.8)$$

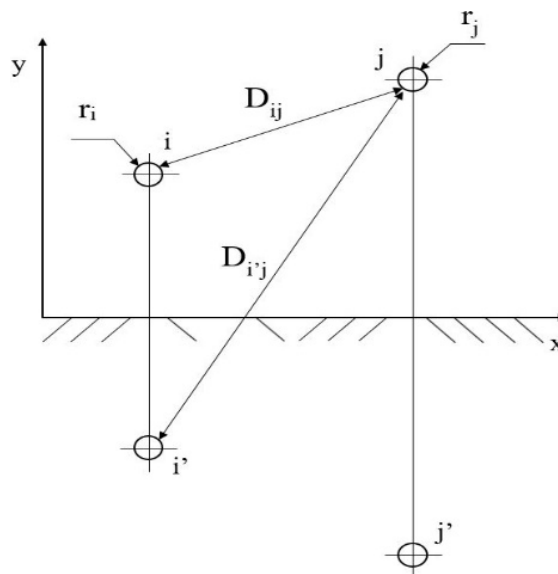
$$p_{ij} = p_{ji} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \quad \text{para os potenciais mútuos} \quad (4.9)$$

Na Figura 4.2, r_i é o raio do i -ésimo condutor, y_i representa a altura do condutor ao solo, consequentemente (x_i, y_i) representam as coordenadas do i -ésimo condutor, D_{ij} representa a distância entre os condutores i -ésimo e j -ésimo, e D'_{ij} representa a distância entre o condutor i -ésimo e a imagem do condutor j -ésimo. As distâncias entre a fonte e o objeto afetado são calculadas da seguinte maneira:

$$D_{ij} = D_{ji} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.10)$$

$$D'_{ij} = D'_{ji} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} \quad (4.11)$$

Figura 4.2 - Convenção utilizada no cálculo dos coeficientes de potencial



Quando as fases da linha de transmissão forem compostas por feixe de condutores emprega-se o raio equivalente r_{eq} a ser inserido nas expressões que definem os coeficientes de potencial, como:

$$r_{eq} = R \cdot \sqrt[n]{\frac{n-r}{R}} \quad (4.12)$$

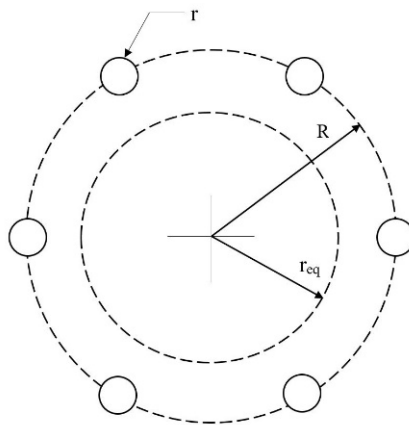
onde:

n é o número de sub-condutores que constituem o feixe;

r é o raio dos sub-condutores;

R é o raio do feixe de condutores, como mostrado na Figura 4.3

Figura 4.3 - Convenção utilizada no cálculo do raio equivalente



Fonte: Autor.

Conhecendo a matriz dos coeficientes de Maxwell $[P]$, o vetor coluna da densidade linear de carga dos condutores é calculado:

$$[\lambda] = [P]^{-1} \cdot [V] \quad (4.13)$$

Calculada a densidade linear de carga presente sobre os condutores, é possível calcular o campo elétrico gerado sobrepondo os efeitos dos condutores e de suas respectivas imagens.

Aplicando a lei de Gauss na forma integral no caso de um condutor de comprimento infinito com densidade linear de carga constante se obtém:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 \cdot d} \vec{u}_r \quad (4.14)$$

onde:

d é a distância do ponto de interesse ao condutor sob potencial;

\vec{u}_r é o vetor unitário na direção radial ao condutor.

Considerando o sistema de referência adotado na Figura 4.2, no qual (x_i, y_i) são as coordenadas do i -ésimo condutor, e sobrepondo os efeitos dos vários condutores inclusive das respectivas imagens, as expressões simplificadas das componentes fasoriais do vetor de campo elétrico são definidas como:

$$\dot{E}_x = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_i \lambda_i \left[\frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \quad (4.15)$$

$$\dot{E}_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_i \lambda_i \left[\frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right] \quad (4.16)$$

Na equação (4.13), ao introduzir o fasor de tensão em termos de valor eficaz, obtém-se o fasor de densidade linear de carga e as componentes de campo elétrico em termos do valor eficaz. Conseqüentemente, ao se introduzir o valor máximo da tensão, obtém-se as componentes de campo elétrico em termos do valor máximo. De acordo com a resolução no 616 da ANEEL, o limite para exposição humana aos campos elétrico e magnético é definido em termos do valor eficaz (ANEEL, 2014).

4.5 CÁLCULO ANALÍTICO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO

Uma interessante simplificação do cálculo dos campos elétrico e magnético foi apresentada por Roscoe e colaboradores (2010). Ela tem como base que a densidade de fluxo magnético B produzido pela corrente i que circula através de uma fração do condutor definido por dl , pode ser calculada utilizando a Lei de Biot-Savart (SUN et al., 2014) mostrado em (4.17). Nesta equação, μ_0 é a permeabilidade do espaço livre, \mathbf{R} define o vetor do elemento dl apontando para um ponto arbitrário. O módulo do vetor \mathbf{R} é representado por R .

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi R^3} (dl \times \mathbf{R}) \quad (4.17)$$

A Lei de Biot-Savart em (4.17) pode ser transformada na expressão mostrada em (4.18), podendo ser aplicada para calcular o campo magnético produzido pela linha aérea de transmissão de energia.

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \left(\frac{dl}{l} \times \frac{\mathbf{a}}{a} \right) \quad (4.18)$$

onde \mathbf{a} é um vetor ortogonal a dl , e está apontando desde dl a qualquer ponto de observação. O comprimento da linha é definido por l . Os ângulos α_1 e α_2 são definidos entre o começo e final do condutor l , tendo com referência o ponto de observação, tal como pode ser visualizado na Figura 4.4.

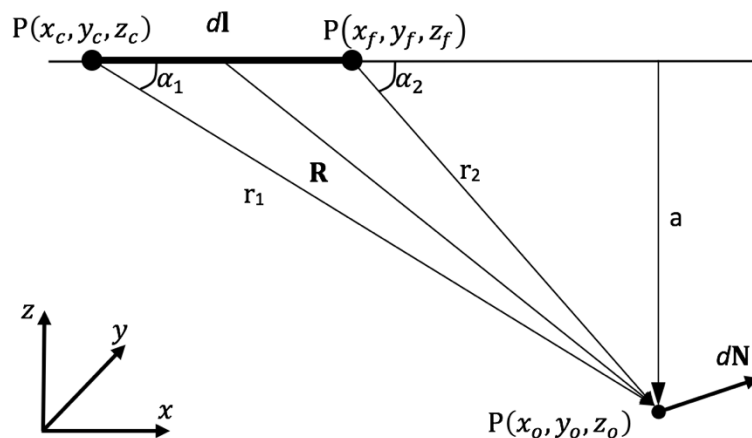
O ponto de início (“c”) do condutor dl é representado por $P(x_c, y_c, z_c)$, enquanto o ponto final é identificado por $P(x_f, y_f, z_f)$, posicionados em 3 eixos. O ponto de observação do campo magnético é arbitrário, sendo identificado por $P(x_o, y_o, z_o)$.

O cálculo do campo magnético foi realizado considerando um dl , e portanto, a densidade de fluxo magnético obtida será dB .

A densidade de fluxo magnético obtida através da Equação (4.17) gera os três componentes definidos por dB_x , dB_y e dB_z nos três eixos como pode ser observado em (4.19).

$$dB = (dB_x, dB_y, dB_z) \quad (4.19)$$

Figura 4.4 - Determinação do campo através da Lei de Biot-Savart



A expressão (4.19) é válida para um único condutor, mas se existem vários condutores paralelos, as componentes individuais devem ser somadas nas direções x, y e z, como é mostrado em (4.20), (4.21) e (4.22). Estas equações darão como resultado três componentes B_{sx} , B_{sy} e B_{sz} . As componentes são válidas para o mesmo instante de tempo, definido por t .

$$B_{sx}(t) = \sum dB_x(t) \quad (4.20)$$

$$B_{sy}(t) = \sum dB_y(t) \quad (4.21)$$

$$B_{sz}(t) = \sum dB_z(t) \quad (4.22)$$

O módulo do vetor de densidade de fluxo magnético B no tempo t pode ser determinado por (4.23).

$$B(t) = \sqrt{B_{sx}(t)^2 + B_{sy}(t)^2 + B_{sz}(t)^2} \quad (4.23)$$

A corrente das fases da linha de transmissão considerada balanceada, apresentam uma defasagem de 120° ($2\pi/3$) entre si, representadas pelas correntes i_1 , i_2 , i_3 com amplitude I_m e frequência angular ω ($= 2\pi f$).

$$i_1 = I_m \cos(\omega t) \quad (4.24)$$

$$i_2 = I_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.25)$$

$$i_3 = I_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (4.26)$$

O valor eficaz da densidade de fluxo magnético B_{eficaz} pode ser obtido por (4.27).

$$B_{eficaz}(t) = \sqrt{\int_{t-T}^t \frac{1}{T} B^2(\tau)} \quad (4.27)$$

A magnitude da densidade de fluxo magnético B é definida por (4.23), $T = 0,016$ s é o

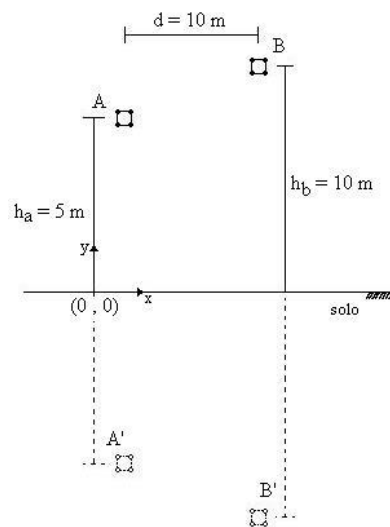
período da frequência fundamental, e τ é uma variável de integração auxiliar.

As expressões acima obtidas foram codificadas em Simulink, tendo como base uma estrutura simples de torre para o cálculo dos módulos da densidade de fluxo magnético, como está apresentado no Capítulo 7.

4.6 EXEMPLO DE CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR LINHA DE TRANSMISSÃO

Seja uma linha de transmissão bifásica, sem cabos para-raios. Cada fase é um arranjo geminado com quatro sub-condutores, distanciados entre si de 45 cm e com raio de 1,257 cm, como mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Geometria de uma linha de transmissão bifásica



Fonte: Autor.

A distância entre as fases ao longo do eixo x , é de 10 m. A altura média dos sub-condutores da fase A é de 5 m e da fase B é de 10 m. Deseja-se calcular o campo elétrico resultante no ponto (10, 1) considerando o ponto de referência das coordenadas no solo sob a fase A.

- Cálculo do raio equivalente:

$$r_{eq} = 0,31819 \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 0,01257}{0,31819}} = 0,20061 \text{ m}$$

- Cálculo da distância entre os condutores i e j :

$$D_{ij} = D_{ji} = \sqrt{(-10)^2 + (5 - 10)^2} = 11,18033 \text{ m}$$

- Cálculo da distância entre o condutor i e a imagem do condutor j :

$$D'_{ij} = D'_{ji} = \sqrt{(-10)^2 + (5 + 10)^2} = 18,02775 \text{ m}$$

- Cálculo dos potenciais próprios e mútuos:

$$p_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2 \cdot 5}{0,20061} = \frac{3,90893}{2\pi\epsilon_0}$$

$$p_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2 \cdot 10}{0,20061} = \frac{4,6021}{2\pi\epsilon_0}$$

$$p_{12} = p_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{18,02775}{11,18033} = \frac{0,47775}{2\pi\epsilon_0}$$

- Montagem da matriz de capacitâncias próprias e mútuas:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 3,900893 & 0,47775 \\ 0,47775 & 4,6021 \end{bmatrix}^{-1} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 0,25911 & -2,68991^{-2} \\ -2,68991^{-2} & 0,22008 \end{bmatrix}$$

- As tensões são definidas como:

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

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

- Considerando $V_{m\acute{a}x} = 500$ kV e $\omega t = 0$ rad, tem-se:

$$\dot{V}_A = (500 + j0) \text{ kV}$$

$$\dot{V}_B = (-250 + j433,0127) \text{ kV}$$

- Cálculo das cargas nos condutores:

$$\dot{Q} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 0,25911 & -2,68991^{-2} \\ -2,68991^{-2} & 0,22008 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 500 \cdot 10^3 \\ (-250 + j433,0127) \cdot 10^3 \end{bmatrix}$$

$$\dot{Q} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} (136.280,7691 - j11.647,6894) \\ -(68.470,9745 + j95.299,8278) \end{bmatrix} [C]$$

assim:

$$\dot{q}_1 = 2\pi\epsilon_0(136.280,7691 - j11.647,6894) [C]$$

$$\dot{q}_2 = 2\pi\epsilon_0(68.470,9745 + j95.299,8278) [C]$$

Substituindo os valores de \dot{q}_1 e \dot{q}_2 nas equações (4.15) e (4.16) resulta:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x1} &= \frac{2\pi\epsilon_0(136.280,7691 - j11.647,6894)}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{10 - 0}{(10 - 0)^2 + (1 - 5)^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{10 - 0}{(10 - 0)^2 + (1 + 5)^2} \right] = 1.727,69 - j147,66 \left[\frac{V}{m} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{y1} &= \frac{2\pi\epsilon_0(136.280,7691 - j11.647,6894)}{2\pi\epsilon_0} \\ &\quad \left[\frac{1 - 5}{(10 - 0)^2 + (1 - 5)^2} - \frac{1 + 5}{(10 - 0)^2 + (1 + 5)^2} \right] = -10.711,72 - j915,51 \left[\frac{V}{m} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x2} &= \frac{2\pi\epsilon_0(-68.470,9745 + j95.299,8278)}{2\pi\epsilon_0} \\ &\quad \left[\frac{10 - 0}{(10 - 10)^2 + (1 - 10)^2} - \frac{10 - 10}{(10 - 10)^2 + (1 + 10)^2} \right] = 0 \left[\frac{V}{m} \right] \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{y2} = \frac{2\pi\epsilon_0(-68.470,9745 + j95.299,8278)}{2\pi\epsilon_0}$$

$$\left[\frac{1 - 10}{(10 - 10)^2 + (1 - 10)^2} - \frac{1 + 10}{(10 - 10)^2 + (1 + 10)^2} \right] = 13.832,52 - j19252,49 \left[\frac{V}{m} \right]$$

Assim sendo:

$$\dot{E}_{xtotal} = \dot{E}_{x1} + \dot{E}_{x2} = 1.727,69 - j147,66 \left[\frac{V}{m} \right]$$

$$\dot{E}_{ytotal} = \dot{E}_{y1} + \dot{E}_{y2} = 3.120,79 - j18.336,97 \left[\frac{V}{m} \right]$$

$$E = \sqrt{(1.727,69)^2 + (147,66)^2 + (3.120,79)^2 + (18.336,97)^2}$$

$$E = 18.681,29 \left[\frac{V}{m} \right] \text{ ou } 18,68 \left[\frac{kV}{m} \right]$$

O campo resultante, para esse caso, será alterado conforme a variação de ωt .

4.7 CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO

O cálculo da densidade de fluxo magnético é análogo ao cálculo do campo elétrico, e é facilitado considerando que, não é necessário calcular o valor da densidade linear de carga induzida sobre cada condutor. Como o valor da densidade de campo depende diretamente da corrente, e considerando o solo plano com permeabilidade relativa igual a 1, conseqüentemente na modelagem definida a seguir, a contribuição do condutor imagem é desprezada.

No cálculo do campo magnético emprega-se a Lei de Biot-Savart (DENO, 1982; ZAFANELLA, 2005), a qual é expressa para um ponto genérico do espaço. O valor da indução magnética B gerada por um condutor retilíneo percorrido por uma corrente I , é dado por (4.28).

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} u_l \times u_r \quad (4.28)$$

onde:

d é a distância entre o condutor e o ponto de interesse;

u_l e u_r são vetores que indicam, respectivamente, a direção da corrente e sua normal;

\times indica o produto vetorial.

A referência utilizada para o cálculo do campo elétrico, Figura 4.2, é reconsiderada, e o vetor da densidade de campo devido ao i -ésimo condutor definido como:

$$\vec{u}_{B,i} = \vec{u}_{l,i} \times \vec{u}_{r,i} = -\frac{y - y_i}{d_i} \vec{u}_x + \frac{x - x_i}{d_i} \vec{u}_y \quad (4.29)$$

Assim, são usadas as seguintes expressões para o cálculo das componentes espaciais (fasoriais) da densidade de fluxo magnético, em função das correntes nos diversos condutores:

$$\dot{B}_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i i_l \left[\frac{y_i - y}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (4.30)$$

$$\dot{B}_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i i_l \left[\frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (4.31)$$

Com o fasor de corrente \dot{I}_l é expresso em termos de valor eficaz, a densidade de fluxo magnético também será definida em termos de valor eficaz.

4.8 EXEMPLO DE CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR LINHA DE TRANSMISSÃO

O trabalho realizado por Silva (2010) apresenta uma linha de transmissão bifásica, sem cabos para-raios, como a representada na Figura 4.5. Com o mesmo arranjo geminado de quatro sub-condutores por fase, distanciados entre si de 45 cm e com raio de 1,257 cm. A distância entre as fases é de 10 m.

A altura média dos sub-condutores da fase A é de 5 m e da fase B é de 10 m. Cada fase é percorrida por uma corrente de 800 A. Deseja-se calcular o campo magnético resultante no ponto (10, 1) considerando o ponto de referência das coordenadas no solo, sob a fase A. Dados:

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

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

Considerando $I_{m\acute{a}x} = 800$ A e $\omega t = 0$ rad, tem-se

$$\dot{I}_A = (800 + j0) \text{ A}$$

$$\dot{I}_B = (-400 - j692,8) \text{ A}$$

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

$$\dot{B}_{xa} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{(800+j0)(5-1)}{(10-0)^2 + (1-5)^2} \right] = (5,5172 + j0) \mu\text{T}$$

$$\dot{B}_{xb} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{(-400+j692,8)(10-1)}{(10-10)^2 + (1-10)^2} \right] = (-8,888 - j15,396) \mu\text{T}$$

A componente $\dot{B}_{x\text{total}}$ será

$$\dot{B}_{x\text{total}} = \dot{B}_{xa} + \dot{B}_{xb} = (-3,3716 - j15,396) \mu\text{T}$$

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

$$\dot{B}_{ya} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{(800+j0)(10-0)}{(10-0)^2 + (1-5)^2} \right] = (13,7931 + j0) \mu\text{T}$$

$$\dot{B}_{yb} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{(-400+j692,8)(10-10)}{(10-10)^2 + (1-10)^2} \right] = 0 \mu\text{T}$$

A componente $\dot{B}_{y\text{total}}$ será

$$\dot{B}_{y\text{total}} = \dot{B}_{ya} + \dot{B}_{yb} = (13,7931 + j0) \mu\text{T}$$

Desta forma, o valor eficaz da densidade de fluxo magnético resultante \dot{B} para $\omega t = 0$, vale aproximadamente:

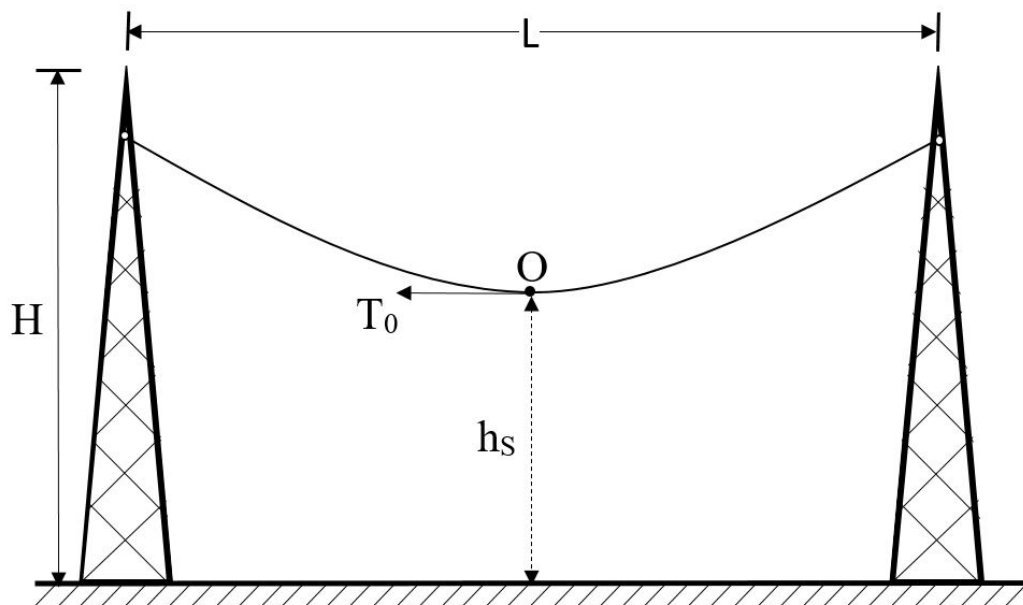
$$B = \sqrt{(-3,3716)^2 + (-15,396)^2 + (13,7931)^2} = 21 \mu\text{T}$$

4.9 MAPEAMENTO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Existem programas escritos em Matlab que apresentam o mapeamento bi e tridimensional dos campos elétrico e magnético das linhas analisadas. No mapeamento dos campos, consideram-se a variação da altura dos condutores em relação ao solo, visto que, essa variação influencia diretamente os valores dos campos elétrico e magnético para o perfil transversal de medição (SILVA, 2010).

Os cabos condutores instalados nas torres de transmissão que sofrem deformações devido ao vento, o próprio peso, a corrente de operação, temperatura, umidade relativa no momento da medição entre outras causas, e descrevem uma catenária conforme apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Conductor suspenso entre duas torres com a mesma altura



Fonte: Modificado de SANTOS et al. (2011)

Nesta tese, a modelagem do comportamento dos condutores suspensos entre duas torres é descrita de acordo com (DENO; ZAFFANELLA, 1982; FUCHS, 1977; ZAFFANELLA, 2005) (FUCHS, 1977; DENO, 1982; ZAFANELLA, 2005).

As características das fontes de campo eletromagnético originadas pelos sistemas de potência são: intensidade, frequência, forma de onda (conteúdo de harmônicos), polarização, variação espacial e temporal do campo. As principais influências são concentradas na indução de tensões, como consequência de variável elétrica dos campos elétrico e magnético.

Na região de baixa frequência (comprimento de onda de 5000 km a uma frequência de 60 Hz) a irradiação se apresenta exclusivamente na região mais próxima das fontes, na qual a mútua perpendicularidade dos campos elétrico e magnético não é mais válida na direção da propagação da onda. As amplitudes dos campos elétrico e magnético obedecem a lei $1/r$ e a densidade de potência, segue a lei de $1/r^2$ (PAUL, 2006).

Os campos elétrico e magnético de baixa frequência podem ser observados separadamente, porque nestas frequências o deslocamento das correntes é desprezível. Os modelos matemáticos e soluções numéricas, assim como os métodos de medições experimentais dos campos elétrico e magnético de baixa frequência das instalações de energia serão discutidos no próximo capítulo.

Os cálculos e medições dos campos elétrico e magnético, de baixa frequência, como também a sua interconexão são os principais problemas na transmissão e distribuição em termos da compatibilidade eletromagnética padronizada e exposição humana à radiação eletromagnética não ionizante. Para resolver as influências eletromagnéticas com geometria complexa na área de baixa frequência são utilizadas as equações de Maxwell que descrevem o campo eletromagnético. As equações de Maxwell podem ser analiticamente resolvidas somente para uma reduzida classe de problemas unidimensionais de campos estáticos e quase estáticos.

Cada arranjo geométrico bidimensional (2D) e tridimensional requerem aplicação de métodos numéricos para se determinar o campo usando softwares específicos (como MAXWELL 3D, EFC-400, FLUX 3D, PDETOOL do MATLAB) e outras ferramentas para uma implementação bem-sucedida da pesquisa.

Para um cálculo 3D da distribuição do campo elétrico, o método de simulação de carga é aplicado (CSM - *Charge Simulation Method*) como também o método de elementos finitos e o método de elementos de contorno indireto (IBEM - *Indirect Boundary Element Method*).

Para calcular a distribuição em 3D do campo magnético de baixa frequência dentro e no em torno das subestações de transformação utiliza-se o procedimento baseado na Lei de Biot-Savart. Este procedimento permite determinar a densidade de fluxo magnético de uma linha reta de comprimento finito associado ao princípio da superposição. Baseado na análise do cálculo teórico, um programa de medição operacional detalhado, que inclui todas as medições no estado estacionário com medição local é mostrado por Salkic e colaboradores (2012) seguindo o IEEE Std 644 (1995a).

Entre os equipamentos de medição de campos estão o EFA-300 *Field Analyzer* da *Wandel & Goltermann*, atual *Narda Safety-Test-Solutions* e o programa EFC-400 da empresa mencionada, que são as ferramentas mais encontradas nas pesquisas ambientais. Estes

equipamentos são utilizados para avaliar os campos elétrico e magnético nas redes de transmissão, distribuição e nas instalações de geração de energia elétrica.

A seleção dos pontos de monitoramento é realizada em locais onde se esperam maiores níveis de campo. A análise da medição dos resultados e suas comparações com os métodos numéricos quando ultrapassam os níveis referenciais podem sugerir perturbações nos níveis do campo eletromagnético. Uma vez confirmada a exatidão dos resultados obtidos pelos cálculos em comparação com os resultados experimentais, torna-se possível introduzir e desenvolver métodos para resolver os problemas práticos relativos ao projeto da linha de transmissão estudada, modificando-os caso seja necessário.

4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram descritos os campos elétrico e magnético gerados por linhas de transmissão, bem como os parâmetros considerados para efetuar os cálculos dos campos. Foi feita uma descrição do método de simulação de cargas e o procedimento de cálculo dos campos elétrico e magnético. Foram mencionados os métodos numéricos e as ferramentas computacionais utilizadas para realizar o mapeamento dos campos estudados.

Foi descrita uma simplificação do cálculo da densidade de fluxo magnético que permite a avaliação do módulo dos valores eficazes considerando um plano onde ficam localizados os cabos e ponto de observação, mas com o conhecimento dos valores da corrente circulante.

Finalmente, concorda-se que o equacionamento físico do ambiente eletromagnético de uma linha de transmissão envolve uma modelagem matemática complexa que oferece pouca aplicabilidade e praticidade ao setor elétrico.

5 ANÁLISE DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO

Neste Capítulo apresentam-se os métodos mais usados para analisar os campos elétricos e magnéticos para justificar o método que foi utilizado para obter os dados desta tese. Tais métodos visam uma maior descrição espacial do campo no percurso das linhas de transmissão aéreas de energia elétrica.

5.1 MÉTODOS DE ANÁLISE DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO

O estudo do campo eletromagnético pode ser realizado utilizando os seguintes métodos:

- Diferenças finitas;
- Elementos de fronteira;
- Elementos finitos.

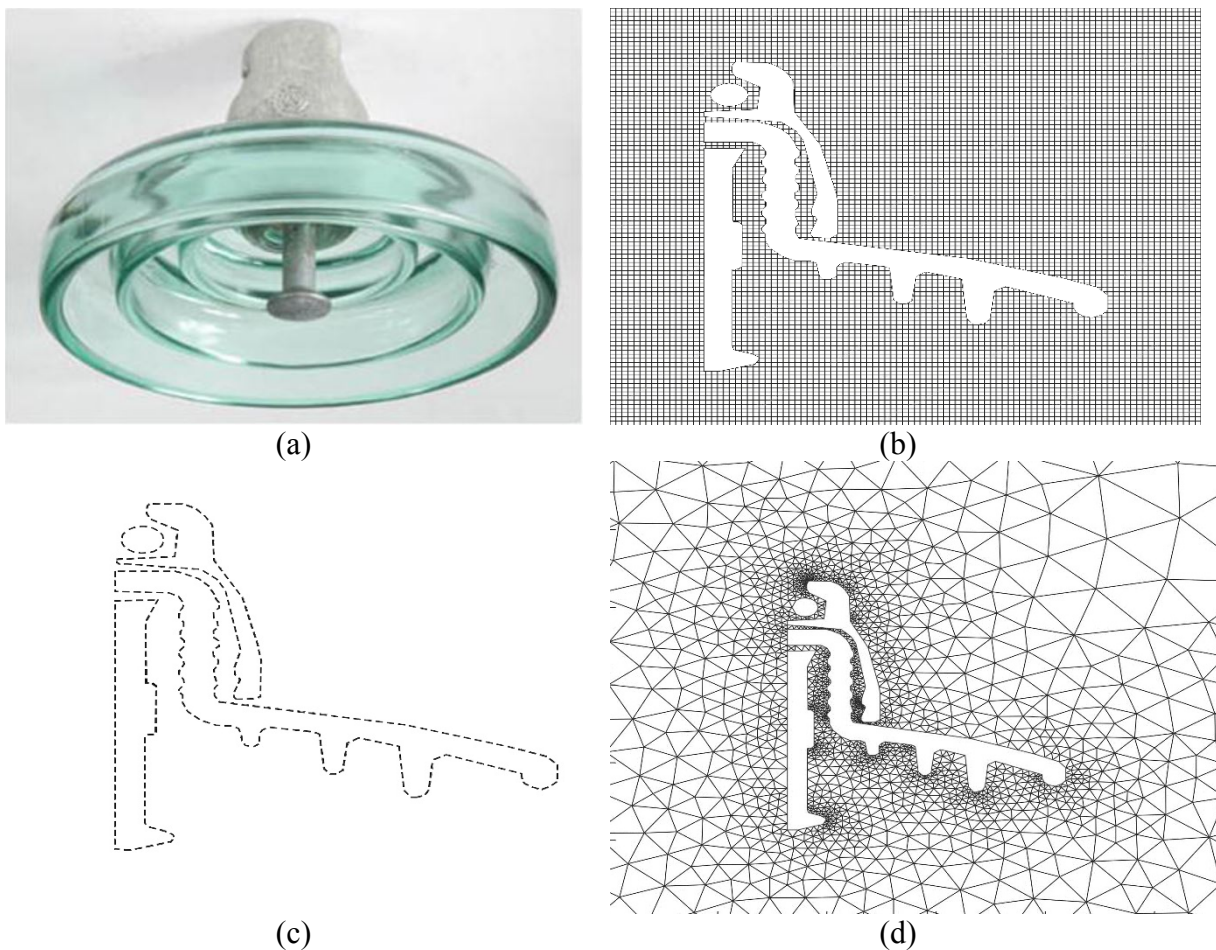
O método das diferenças finitas foi originalmente desenvolvido por Southwell em 1946 (CHARI; SALON, 2000), mas foi pouco utilizado até o início dos anos 1960 quando surgiram os computadores digitais para melhorar a velocidade de processamento. Este método baseia-se no pressuposto de que a área do problema pode ser dividida em uma estrutura de grade, como mostrado na Figura 5.1(a). A partir dela, é gerada uma equação numérica para cada cruzamento da grade, a qual pode ser obtida através de uma expansão da série de Taylor das equações diferenciais que descrevem a solução do campo. Tal com para a matriz resultante, a formulação do potencial pode ser avaliada em cada nó. Normalmente, a matriz de equações é resolvida através de um método iterativo (HADDAD; WARNE, 2007).

O método dos elementos de fronteira é uma outra técnica de análise que modela o problema através da representação das superfícies das regiões sob estudo em vez modelar o interior, em contraste com os últimos dois métodos. Isto resulta em um problema reduzido em dimensão. Assim sendo, um problema bidimensional é modelado com elementos unidimensionais (linha), e um tridimensional com elementos bidimensionais. Uma vantagem significativa deste método é o fato das regiões de ar entre os objetos sólidos não precisarem ser discretizadas. Isto pode ser um grande benefício quando se gera uma malha tridimensional. Um exemplo da discretização de um elemento de fronteira é mostrado na Figura 5.1(b).

No método de elementos de fronteira, as equações numéricas do problema reduzido em dimensão são formadas a partir do teorema de Green para as equações diferenciais parciais que descrevem a distribuição do campo na região em estudo. Uma equação se forma nos nós sobre as superfícies exteriores de todas as regiões e resulta em uma matriz não-simétrica densamente

compactada. É difícil de se encontrar um método eficaz para inverter a matriz que ainda necessita de longos tempos de solução. O método é aplicável a ambos os problemas, bidimensionais e tridimensionais. No entanto, o último resulta em uma grande matriz assimétrica para ser invertida, de modo que limita a complexidade do problema a ser resolvido.

Figura 5.1 - Exemplo das malhas geradas no isolador mostrado em (a) através dos métodos de análise. Em (b) pelo método das diferenças finitas. Em (c) através dos elementos de fronteira e finalmente em (d) por meio de elementos finitos



Fonte: O autor.

O método dos elementos finitos consiste na transformação da área deste problema complexo em pequenos elementos de uma região contínua (discretizado). Dessa forma, uma solução aproximada é utilizada para quantificar o campo em cada elemento, como pode ser observado na Figura 5.1(c). Embora seja um problema bidimensional, o método é igualmente adaptável a situações tridimensionais. No entanto, a geração da malha é mais complexa e

consome muito mais tempo de processamento, existindo inclusive situações com mais de 1 milhão de incógnitas.

Geometrias complexas podem ser representadas pela escolha adequada de elementos. Cada elemento pode ter diferentes propriedades físicas, que podem ser não-lineares (ou seja, dependentes do campo). Transforma-se então as equações diferenciais parciais que regem as formas de energia numa expressão algébrica criada para o potencial de cada nó através da extremização (maximização ou minimização) da energia funcional. O conjunto resultante de equações é amplo, porém existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para inverter a matriz de forma eficiente.

5.2 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Todas as técnicas descritas na seção anterior têm as suas vantagens e desvantagens, de modo que a escolha final pode ser complicada. Por exemplo, embora seja fácil de montar um dado problema, a técnica das diferenças finitas não é facilmente aplicada à modelagem de geometrias irregulares, tais como as superfícies inclinadas ou curvas. A distribuição nodal também pode ser ineficiente. Isto não é assim com elementos finitos. Da mesma forma, o método dos elementos de fronteira pode modelar de forma eficiente as regiões em que as propriedades do material são lineares, mas não é eficiente na manipulação de materiais não lineares. Além disso, o tipo de matriz formada não é passível de solução eficiente.

O método dos elementos finitos é bem adequado para a modelagem de materiais não-lineares, e a forma esparsa da matriz resultante faz com que seja facilmente adaptável a uma solução eficiente, mas é necessário discretizar o espaço livre em torno do objeto a ser modelado.

Torna-se difícil obter um julgamento definitivo sobre qual método é melhor. Distintos grupos chegarão a conclusões diferentes, de acordo com a faixa específica de aplicações e problemas. No entanto, os resultados e as aplicações têm mostrado que o método de projeto com elementos finitos é robusto e flexível, e é geralmente mais adequado às necessidades dos projetistas, embora em alguns casos escolha-se o método de elementos de fronteira.

Na seguinte seção far-se-á uma breve introdução ao método dos elementos finitos utilizado para modelar o diagrama de radiação gerado pelo protótipo de linha de transmissão usado nessa tese.

5.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico aproximado, para análise dos diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos, e que são descritos através de equações diferenciais parciais (JIN, 2010). Com a transformação dessas equações diferenciais em um conjunto de equações algébricas lineares sob determinadas condições de contorno e condições iniciais, o MEF em lugar de aproximar-se ao operador diferencial, ele aproxima-se da solução da equação diferencial parcial.

Problemas com valores de fronteira são também chamados de problemas de campo. O campo é o domínio de interesse e na maioria das vezes representa a própria estrutura física (SADIKU, 2004). As variáveis de campo são as variáveis dependentes dos interesses regidos pelo diferencial da equação. As condições de contorno são os valores especificados das variáveis do campo sobre os limites do mesmo.

Dependendo do tipo de problema físico em análise, as variáveis de campo podem incluir o deslocamento físico, a temperatura, o fluxo de calor e a velocidade do fluido, tornando a aplicação útil quando se deseja modelar uma realidade física, como tensões, deformações e várias outras grandezas, através de métodos matemáticos numéricos (RADE, 2011).

A ideia principal do Método dos Elementos Finitos consiste em dividir o domínio do problema em regiões de geometria simples. Este método é bastante utilizado na engenharia, pois nesta, costuma-se resolver problemas complexos subdividindo-os em problemas mais simples (JIN, 2010). Como as sub-regiões apresentam dimensões finitas, estas são chamadas de elementos finitos. Esses elementos finitos são conectados entre si através de determinados pontos, denominados nós ou pontos nodais.

Ao conjunto de elementos finitos e pontos nodais, dá-se o nome de malha de elementos finitos. Essas malhas apresentam diversas formas geométricas em função do tipo e da dimensão. A precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, e do tamanho e tipo dos elementos presentes na malha.

Um dos aspectos mais importantes do MEF diz respeito a sua convergência. Embora, trata-se de um método aproximado, pode-se demonstrar que numa malha a ser implementada, a medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, a quantidade de nós tenderá a infinito. Dessa forma, a solução obtida converge para a solução exata do problema, ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos serão os resultados da análise.

O MEF pode ser dividido em 4 etapas (GUO; HAYAT; WANG, 2011):

A. Discretização do Domínio quando o método se inicia com a discretização, que consiste em dividir o domínio do problema em um número de elementos finitos que não se sobreponham. O tipo e o número de elementos a serem utilizados devem ser escolhidos de modo a representar adequadamente a geometria do problema e caracterizar convenientemente as variações da solução ao longo do domínio.

A partir dos valores variáveis de campo nos nós, é feita uma aproximação para se obter os valores dessa variável em pontos não nodais (no interior do elemento). O ponto crucial do método é a variável de campo ter que representar um escalar, como por exemplo, o potencial elétrico (NASCIMENTO, 2008).

Para a aproximação de V_e no interior de um elemento utiliza-se uma aproximação polinomial. Para o caso de um elemento triangular:

$$V_e(x, y) = a + b * x + c * y \quad (5.1)$$

Como a equação de V_e possui uma variação do potencial linear, isto equivale dizer que o campo elétrico é uniforme dentro do elemento (e). Tem-se assim (SADIKU, 2004)

$$E_e = -\nabla V_e = -(b\hat{a}_x + c\hat{a}_y) \quad (5.2)$$

B. Obtenção das equações regentes do elemento quando nesta etapa são escolhidas as funções de interpolação que melhor representam as variáveis de campo no interior de cada elemento. Frequentemente, mas nem sempre, as funções polinomiais são escolhidas como funções de interpolação devido à facilidade que oferecem para derivação e integração. Os graus dos polinômios utilizados estão relacionados ao número de incógnitas nodais de cada elemento, devendo também atender a certos requisitos de continuidade das variáveis de campo a serem satisfeitos nos nós e nas fronteiras entre elementos imediatamente vizinhos (NASCIMENTO, 2008).

Considere-se o elemento triangular típico da Figura 5.2 e os potenciais V_{e1} , V_{e2} , V_{e3} , nos nós 1, 2 e 3, respectivamente. O valor para V_e poderá ser encontrado por:

$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} \quad (5.3)$$

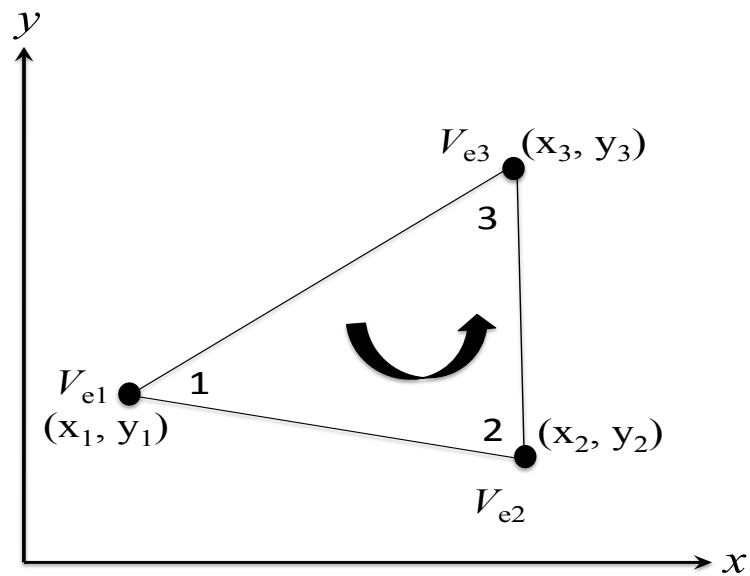
sendo,

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (5.4)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (5.5)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (5.6)$$

Figura 5.2 - Elemento triangular a ser analisado



Fonte: Autor.

Pode-se definir os pontos para a Figura 5.2 como sendo:

$$P_1 = y_2 - y_3 \quad (5.7)$$

$$P_2 = y_3 - y_1 \quad (5.8)$$

$$P_3 = y_1 - y_2 \quad (5.9)$$

$$Q_1 = x_3 - x_2 \quad (5.10)$$

$$Q_2 = x_1 - x_3 \quad (5.11)$$

$$Q_3 = x_2 - x_1 \quad (5.12)$$

Nestas equações P_i e Q_i ($i = 1, 2, 3$) são os números dos nós locais e são os termos da matriz dos coeficientes dos elementos que são determinados por (SADIKU, 2004):

$$[C_{ij}^{(e)}] = \frac{1}{4A} [P_i P_j + Q_i Q_j] \quad (5.13)$$

onde:

$$A = \frac{1}{2} (P_2 Q_3 - P_3 Q_2) \quad (5.14)$$

C. Conexão de todos os elementos no domínio, isto é, uma vez escolhidos o tipo e o número de elementos e as funções de interpolação, deve-se estabelecer as relações matriciais expressando o comportamento em termos de propriedades físicas e geométricas conhecidas para cada elemento. Em outras palavras, procede-se à formulação em nível elementar. Pode-se usar também o processo direto, que é baseado no método da rigidez da análise estrutural que permite obter as relações matriciais entre as forças e deslocamentos nodais a partir das relações de equilíbrio de forças e compatibilidade de deslocamentos.

Para caracterizar o comportamento do sistema completo resultante da associação dos vários elementos, deve-se agrupar de forma adequada as matrizes de cada um. Em outras palavras, deve-se combinar as equações matriciais, expressando o comportamento dos elementos individuais para formar as equações matriciais que devem descrever. Este método é conhecido como montagem das matrizes globais. No processo de montagem impõe-se uma condição em cada nó, onde as variáveis de campo são as mesmas para cada elemento compartilhando aquele nó (NASCIMENTO, 2008).

Após levar em consideração um elemento típico, o próximo passo é conectar todos esses elementos em um único domínio. A energia associada à conexão de todos os elementos na malha é dada por (SADIKU, 2004):

$$W = \sum_{e=1}^N \frac{1}{2} \epsilon [V]^T [C] [V] \quad (5.15)$$

onde:

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

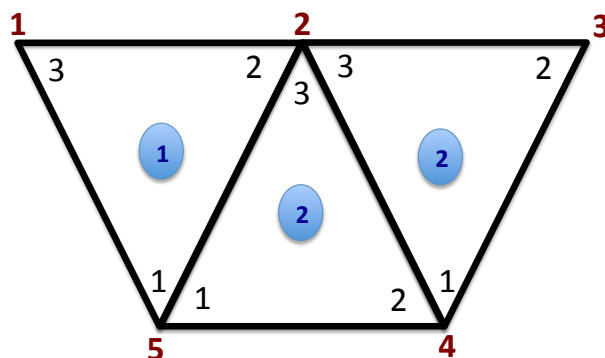
onde n é o número de nós, N o número de elementos e $[C]$ a matriz de rigidez global, que representa a conexão das matrizes dos coeficientes dos elementos individuais.

Considerando uma malha composta por N elementos finitos e uma numeração global k , a matriz rigidez global para esta seria dada por:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1k} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{k1} & C_{k2} & \dots & C_{kk} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Para facilitar o entendimento da Figura 5.3, a numeração externa (em vermelho) é a numeração global e a interna (em preto) é a local, que deve sempre obedecer ao sentido anti-horário. Para esta figura, a matriz de rigidez global seria da ordem 5×5 . A contribuição da posição i, j em $[C]$ vem de todos os elementos que contém os nós i e j . A Figura 5.3 mostra todos os elementos da matriz rigidez global, para este domínio.

Figura 5.3 - Conexão dos elementos



Fonte: Autor.

D. Resolução do sistema de equações obtidas onde ao final do processo de montagem das matrizes globais, o modelo matemático do problema estará representado por um conjunto de equações que podem ser lineares ou não lineares, algébricas ou diferenciais, dependendo da natureza do problema focado.

A seguir apresenta-se a Matriz Rigidez Global.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} & C_{13}^{(1)} & C_{12}^{(2)} & C_{12}^{(1)} + C_{13}^{(2)} & 0 \\ C_{31}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 & C_{32}^{(1)} & 0 \\ C_{21}^{(2)} & 0 & C_{22}^{(2)} + C_{11}^{(3)} & C_{23}^{(2)} + C_{13}^{(3)} & C_{12}^{(3)} \\ C_{21}^{(1)} + C_{31}^{(2)} & C_{23}^{(1)} & C_{32}^{(2)} + C_{31}^{(3)} & C_{22}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{33}^{(3)} & C_{32}^{(3)} \\ 0 & 0 & C_{21}^{(3)} & C_{23}^{(3)} & C_{22}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

As equações embutidas em (5.18) devem ser resolvidas numericamente para a determinação dos valores das variáveis de campo nos pontos nodais. Neste processo de resolução são selecionados alguns procedimentos numéricos apropriados, implementados sob a forma de rotinas computacionais (NASCIMENTO, 2008). A partir do cálculo variacional, sabe-se que a equação de Laplace (ou de Poisson) vai ser satisfeita quando a energia total no domínio for mínima. Portanto, as derivadas parciais de W , em relação a cada valor nodal do potencial, devem ser nulas.

Enumerando, primeiramente todos os nós livres e, posteriormente, os nós fixos, pode-se escrever a energia para a conexão de todos os elementos da malha como:

$$W = \frac{1}{2} \epsilon [V_f \quad V_p] \begin{bmatrix} C_{ff} & C_{fp} \\ C_{pf} & C_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ V_p \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

onde f e p referem-se aos nós com potenciais livres e fixos (pré-estabelecido), respectivamente.

Uma vez que V_p é constante, apenas diferencia-se em relação a V_f . Portanto, o método da matriz de banda é dado por:

$$[C_{ff}][V_f] = -[C_{fp}][V_p] \quad (5.20)$$

A solução da equação 5.20 é restrita a um problema bidimensional envolvendo a equação de Laplace $\nabla^2 V = 0$ (SADIKU, 2004).

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

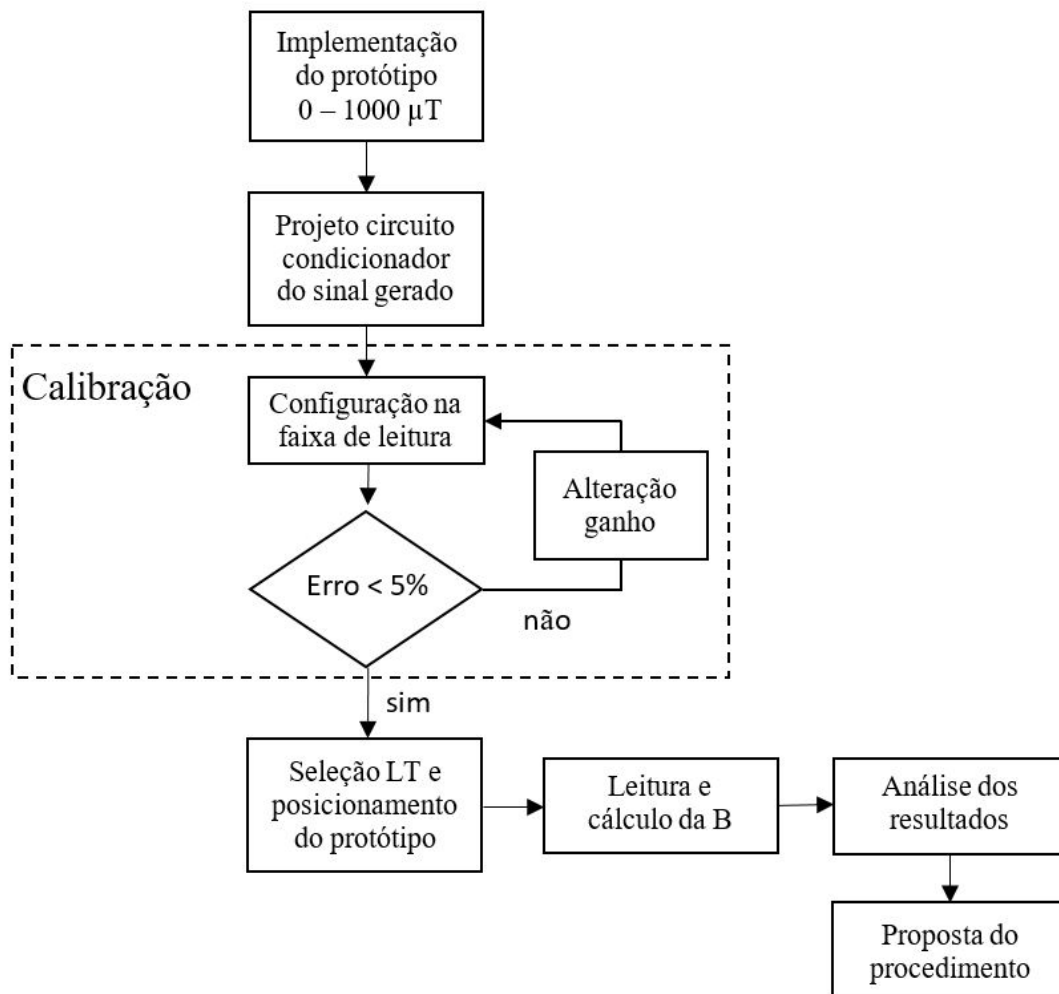
Foi apresentado neste capítulo uma descrição geral dos métodos mais conhecidos para encontrar a solução do campo eletromagnético em espaço cujos domínio pode ser complexo, com vantagens e desvantagens. Dos métodos estudados, optou-se por descrever com maior detalhe o MEF, que esboça o domínio do problema em regiões de geometria simples, mas que precisa de maior velocidade processamento e é o que está sendo usado nos capítulos seguintes.

No Capítulo 7, apresenta-se aplicação do método em algumas estruturas de uma SE, para mostrar as linhas de campo magnético e elétrico no em torno das linhas e de equipamentos que formam parte das instalações.

6 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia seguida durante o levantamento dos campos eletromagnéticos nas linhas de transmissão que foi dividida nas seguintes partes: 1) Implementação do protótipo de medição; 2) Projeto do condicionador do sinal; 3) Implementação do calibrador constituído por uma bobina de Helmholtz e a configuração do ganho do condicionador do sinal; 4) Descrição da linha de transmissão e do local onde foram realizadas as atividades da pesquisa; 5) Medições do campo magnético que descrevem os procedimentos para efetuar o levantamento dos níveis de campo magnético; 6) Análise dos resultados e, finalmente 7) a proposta do procedimento. Os itens (6) e (7) estão descritos no Capítulo dos Resultados.

Figura 6.1 - Diagrama de eventos desenvolvidos na metodologia

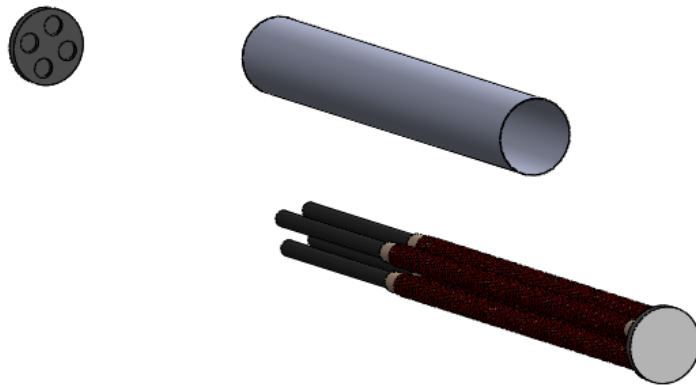


Fonte: Autor.

6.1 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DE MEDIÇÃO E RESULTADOS

O protótipo construído para o levantamento dos campos eletromagnéticos nas linhas de transmissão é mostrado na Figura 6.2 sendo formado por 4 barras cilíndricas de ferro com 1 m de comprimento. Cada barra tem um diâmetro de 19 mm envolvida por 2450 espiras de cobre.

Figura 6.2 – Estrutura interna do protótipo medidor com vista explodida mostrando as 4 barras de ferro com as espiras no em torno



Fonte: Autor.

As espiras dos solenoides formam uma única camada. O fio de cobre usado neste medidor tem um diâmetro de aproximadamente 0,4 mm e foi enrolado sobre um tubo de PVC de 1 mm de espessura, evitando o contato com a barra de ferro. As 4 barras de ferro ficam apoiadas em duas tampas usinadas de Nylon 6.0 de 1,8 cm, sobre as quais se apoiam as barras de ferro, fixando-as dentro do tubo de PVC de 7,2 cm de diâmetro. A parte externa do tubo foi coberta com um filme de papel alumínio aterrado no decorrer do processo de medição. A única face do tubo sem blindagem do alumínio foi a face que fica direcionada à LT. A conexão dos solenoides é em paralelo e numa das tampas foi colocada o terminal de saída do arranjo.

A densidade de fluxo magnético na estrutura foi determinada através da Lei de Faraday por meio da expressão da tensão de circuito aberto V_{oc} , apresentada em (6.1).

$$V_{oc} = 2\pi f \mu_r N S B \quad (6.1)$$

Abrindo a expressão (6.1) em função do raio do cilindro, tem-se:

$$V_{oc} = 2\pi f \mu_r N (\pi r^2) B \quad (6.2)$$

onde B é a componente da densidade de fluxo magnético presente no ar que incide de forma paralela ao eixo da espira, f é a frequência de operação (ROSCOE; JUDD, 2013).

Em (6.3) é calculada a indutância do solenoide.

$$L_a = \frac{[\mu_0 \mu_r (\pi r^2) N^2]}{[l + 0,9(r)]} \quad (6.3)$$

Para uma máxima transferência de potência é necessário o acoplamento da impedância. Caso a carga for resistiva, a indutância L_a deve ser compensada por uma capacitância, que é determinado por (6.4).

$$C_s = \frac{1}{[(2\pi f)^2 L_a]} \quad (6.4)$$

Assim, a carga R_L deve ser igual a R_a tal como é mostrado em (6.5). Como o indutor sob um campo magnético gera uma tensão de circuito aberto V_{OC} , a tensão de saída $V_{saída}$ será a metade da tensão de circuito aberto, dado por (6.5).

$$V_{saída} = \frac{1}{2} V_{OC} = \pi f \mu_r N (\pi r^2) B \quad (6.5)$$

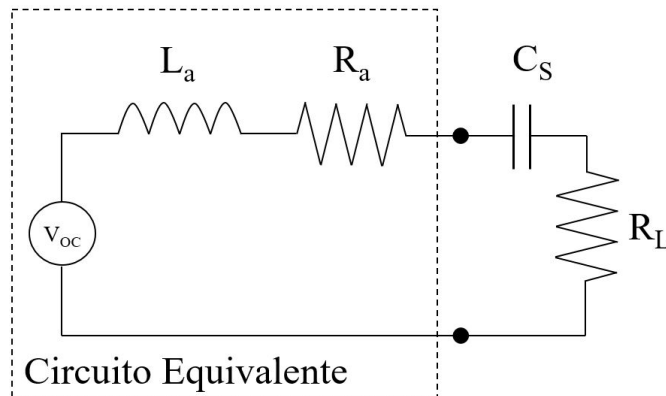
O circuito equivalente da antena é mostrado na Figura 6.3. Este foi modificado em relação a proposta apresentada pela norma IEEE Std 1308 (1995b) sem considerar a capacitância parasita devido à baixa frequência de operação do sinal de interesse existente.

A potência de saída por unidade de volume pode ser determinada usando o comprimento do núcleo pela seguinte relação:

$$\frac{P_{saída}}{V_{ol}} = \frac{\left(\frac{V_{OC}}{2}\right)^2}{R_a} \frac{1}{[\pi r^2 l]} = \frac{\left[\frac{(\pi f \mu_r N (\pi r^2) B)^2}{R_a}\right]}{[\pi r^2 l]} \quad (6.6)$$

$$\frac{P_{saída}}{V_{ol}} = \frac{\left[\frac{f^2 \mu_r^2 N^2 \pi^4 r^4 B^2}{R_a} \right]}{[\pi r^2 l]} \quad (6.7)$$

Figura 6.3 – Modelo do circuito aberto equivalente entre linhas pontilhadas da antena



Fonte: Autor.

Sabendo que R_a é igual a:

$$R_a = \rho N(2\pi r) \quad (6.8)$$

e que ρ é a resistência por unidade de comprimento do fio de cobre utilizado, tem-se:

$$R_a = 23,08 \, \Omega$$

$$L_a = 0,385 \, \text{H}$$

A capacitância C_s que deve ser utilizada para compensar a indutância equivalente é:

$$C_s = 73,6 \, \mu\text{F}$$

Dessa forma, a relação (6.8) ao substituir na equação (6.7) pode ser simplificada,

$$\frac{P_{saída}}{V_{ol}} = \frac{2\pi^2 r N \mu_r^2 f^2 B^2}{4\rho l} \quad (6.9)$$

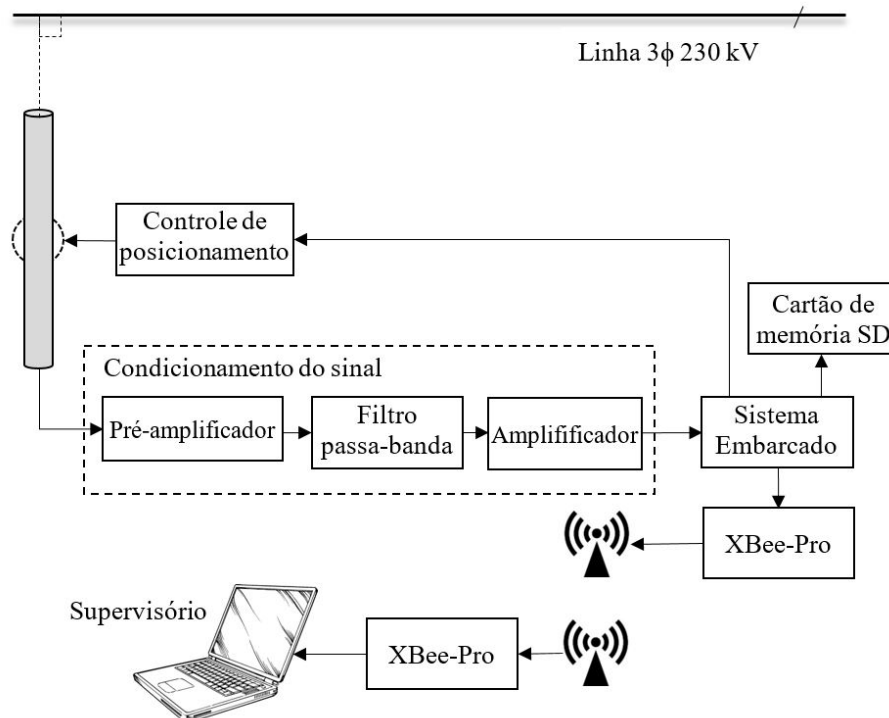
As expressões apresentadas permitem configurar o circuito de aquisição e continuar com o condicionamento do sinal dedicado utilizando um circuito embarcado. A relação (6.9) permite ter uma noção interessante da dependência da saída com relação as dimensões geométricas do solenoide.

6.2 CONDICIONAMENTO DO SINAL

A densidade de fluxo magnético gerada pela LT produz no protótipo uma tensão detalhada em (6.2). Considerando que a tensão induzida é de uma amplitude na ordem dos microvolts, o sinal foi amplificado e condicionado.

O circuito que foi implementado é ressaltado dentro das linhas pontilhadas da Figura 6.4. Os outros blocos serão as bases para trabalhos a realizar no futuro para um melhor tratamento dos dados.

Figura 6.4 - Representação do circuito de aquisição de dados a ser implementado para realizar a leitura da antena

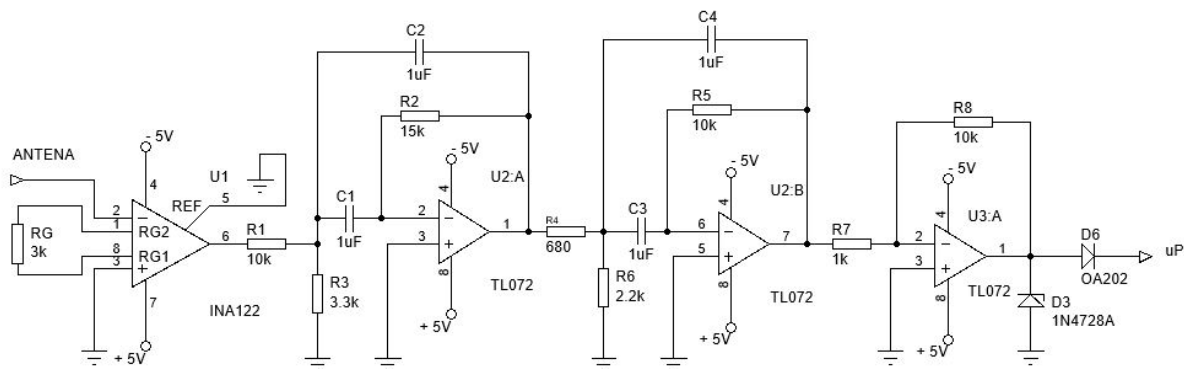


Fonte: Autor.

O condicionamento do sinal foi realizado pelo circuito mostrado na Figura 6.5. O circuito é conformado por de três estágios. O primeiro estágio conformado por amplificador de instrumentação, o INA122 da Texas Instruments com CMRR = 90 dB, o segundo estágio por

um filtro ativo passa-banda de quarta ordem com frequência central em 60 Hz e com largura de banda de 40 Hz. O último estágio é constituído por um amplificador com ganho absoluto total igual a 500 ou 54 dB para os níveis de campo encontrados neste estudo.

Figura 6.5 - Circuito de condicionamento do sinal



Fonte: Autor.

Na Tabela 6.1, a relação dos níveis e dos ganhos necessários a serem obtidos pelo circuito condicionador do sinal de forma a não distorcer o sinal medido.

Tabela 6.1 - Ganhos absolutos do circuito para diferentes níveis mensurados da densidade de fluxo magnético

Densidade de Fluxo Magnético [T]	Tensão Saída Estrutura [V]	Ganho	Tensão Saída [V]
6,00E-08	3,14E-03	500	1,57
6,00E-07	3,14E-02	100	3,14
6,00E-06	3,14E-01	10	3,14
6,00E-05	3,14E+00	1	3,14
6,00E-04	3,14E+01	0,1	3,14
1,00E-03	5,24E+01	0,01	0,524

Fonte: Autor.

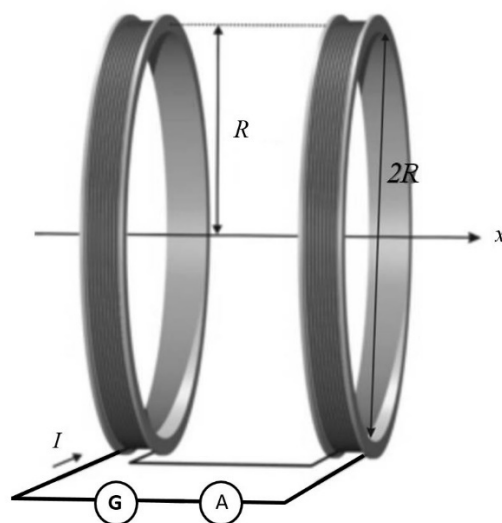
Para níveis acima de $6 \mu\text{T}$, o circuito da Figura 6.5 precisou de alterações, como a supressão do último amplificador e um arranjo divisor de tensão como acontece para uma densidade de fluxo magnético de $1000 \mu\text{T}$.

O protótipo foi posicionado a 30 m do eixo da LT, assim posicionando-se a uma distância maior do que o estabelecido pela faixa de servidão segundo indicado pela norma NBR 5422 (ABNT, 1985). A antena realizou o movimentação de varredura pretendendo mapear o em torno da LT. Os níveis obtidos foram comparados com os valores teóricos obtidos pelo Elekrus, ferramenta esta desenvolvida no Matlab (SANTOS et al., 2011).

6.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CALIBRADOR

Uma bobina de Helmholtz (ISHII et al., 2013) foi construída no laboratório de Engenharia Elétrica da UNIR possibilitando a geração de níveis de densidade de fluxo magnético de 0 até $1000 \mu\text{T}$. As bobinas montadas foram no formato circular, com raio R de 21,5 cm num suporte de fibra de vidro. Na Figura 6.6 podem ser observadas as duas bobinas, cada bobina tem 150 espiras, totalizando 300 espiras. O cabeamento utilizado foi o fio de cobre 20 AWG. A fonte G utilizada foi um autotransformador TDGC2-0,5 kVA como fonte de alimentação do circuito operando na mesma frequência da rede, monitorando-se a corrente circulante para evitar que seja ultrapassada a corrente máxima do fio condutor.

Figura 6.6 – Esquema de conexão da bobina de Helmholtz



Fonte: Modificado de Ishii e colaboradores (2013)

O protótipo do medidor de campo magnético foi posicionado paralelo ao eixo da bobina de Helmholtz, a uma distância de 21,5 cm. Considerando uma densidade de fluxo magnético

distribuída uniformemente, foram efetuadas 5 rotinas de leitura tendo em cada faixa de leitura um erro menor que 5%. Tais resultados confirmam o comportamento linear de acordo com os níveis de densidade de fluxo magnético existente. Na Tabela 6.2 apresenta-se o levantamento das tensões obtidas quando mensurados níveis de campo magnético entre 0 e 100 μT . As leituras dos valores eficazes foram realizadas utilizando um osciloscópio Tektronix de 200 MHz, modelo TDS2022C, N^o série CO14974 e um multímetro Fluke, modelo 117, N^o série 27870600WS.

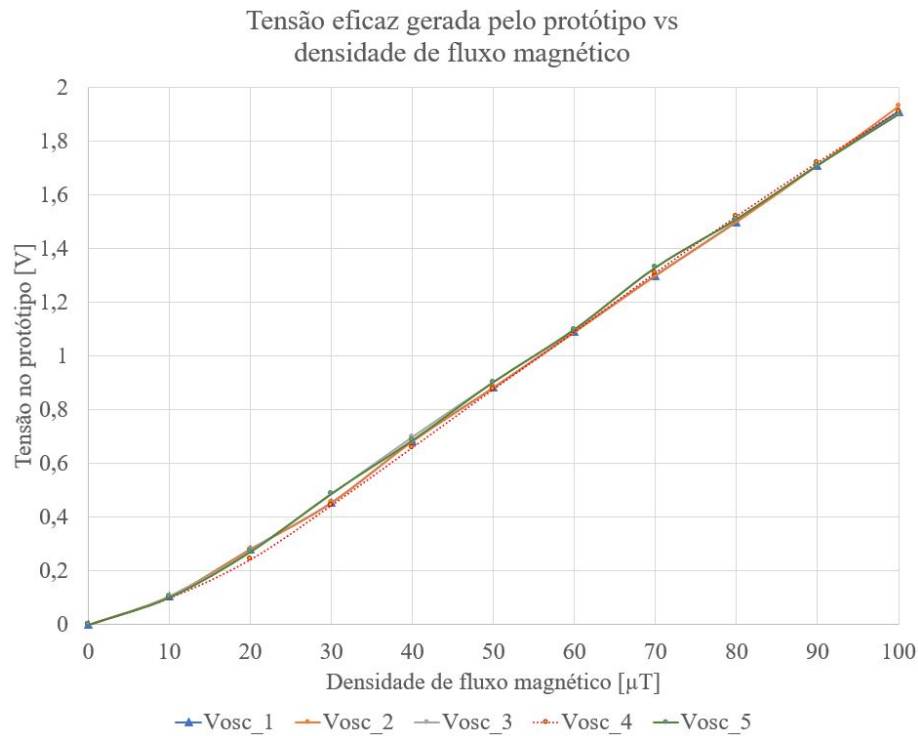
Uma segunda rotina de medidas foi efetuada, reposicionando o protótipo ortogonalmente ao eixo da bobina de Helmholtz. O sinal mensurado apresentou níveis menores aproximando-se a zero com um erro menor que 35%. O equipamento utilizado para verificar as leituras da densidade de fluxo magnético gerada pela bobina foi o medidor de campo da ICEL, modelo EM-8000, No. Série E8000.0121 (ICEL, 2008) num ambiente com temperatura controlada próxima dos 25,°C e umidade relativa do ar de 38% (INPE, 2017).

Tabela 6.2 – Valores de tensão obtidos do protótipo no momento de ser exposto a níveis de densidade de fluxo magnético entre 0 e 100 μT

Densidade de Fluxo Magnético [μT]	Primeira rotina protótipo [V]	Segunda rotina protótipo [V]	Terceira rotina protótipo [V]	Quarta rotina protótipo [V]	Quinta rotina protótipo [V]
0	0	0	0	0	0
10	0,106	0,106	0,106	0,0995	0,0995
20	0,282	0,282	0,276	0,243	0,241
30	0,455	0,455	0,487	0,445	0,445
40	0,684	0,684	0,7	0,66	0,66
50	0,883	0,883	0,904	0,877	0,877
60	1,09	1,09	1,1	1,09	1,09
70	1,3	1,3	1,33	1,31	1,31
80	1,5	1,5	1,51	1,52	1,52
90	1,71	1,71	1,71	1,72	1,72
100	1,91	1,93	1,90	1,91	1,90

Fonte: Autor. Na Figura 6.7 são plotados os pontos gerados com os dados obtidos da Tabela 6.2. Como pode ser observado nesta tabela, o protótipo apresenta uma reposta linear na saída quando submetido aos níveis indicados de densidade de fluxo magnético.

Figura 6.7 – Curvas obtidas com o levantamento da tensão para níveis de densidade de fluxo magnético entre 0 e 100 μT



Fonte: Autor.

6.4 DESCRIÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

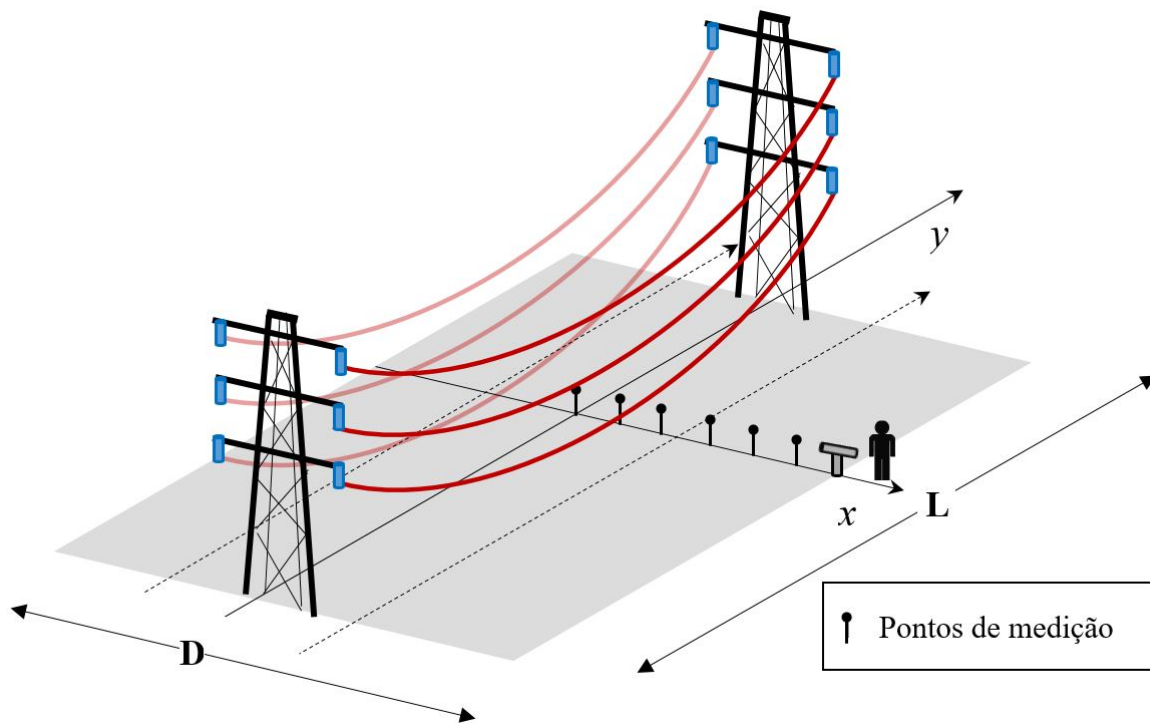
As medições de campo magnético em torno da LT foram realizadas na linha de distribuição proveniente da subestação Porto Velho I, denominada SE PVH. A subestação tem três setores: um de 230, outro de 69 e um terceiro de 13,8 kV. O setor de 230 kV tem quatro bays duplos arranjados em barra dupla do tipo disjuntor e quatro seccionadoras por circuito e dois transformadores de 60 MVA, 230-69-13,8 kV. O setor de 69 kV tem seis bays duplos e arranjo idêntico ao do setor de 230 kV. O setor de 13,8 kV tem um arranjo da barra principal e de transferência com quatro circuitos de saída (SONDOTÉCNICA, 2016).

A linha de distribuição percorre paralela a BR 364, na entrada da cidade de Porto Velho, próxima do campus José Ribeiro Filho da Universidade Federal de Rondônia. A escolha teve o intuito de mensurar uma linha com menor corrente circulante e com a menor intensidade de campo magnético gerado num local com pouca movimentação de pedestres.

6.5 MEDIÇÕES DE CAMPO MAGNÉTICO

Os níveis de campo magnético foram coletados tendo como referência o ponto médio da linha imaginária paralela ao eixo que une a duas torres, seguindo uma perpendicular as duas torres de distribuição, como mostrado na Figura 6.8. Foram realizadas 5 leituras do campo magnético nos 3 eixos com o medidor comercial da ICEL, modelo EM-8000, No. Série E8000.0121 (ICEL, 2008). Os valores obtidos permitem a comparação das leituras realizadas com o medidor implementado e com o valor teórico sob condições de operação indicados na Tabela 7.5.

Figura 6.8 – Esquema de posicionamento do protótipo no ponto de monitoramento



Fonte: Autor.

As leituras foram realizadas deslocando-se o protótipo de medição dos campos magnéticos desenvolvidos para esta tese de acordo com os ângulos descritos na Figura 6.9. O intuito das leituras foi verificar a diretividade deste protótipo na presença do campo gerado por uma linha de transmissão de 13,8 kV. O equipamento de medição usado nos testes de leitura foi um osciloscópio digital Minipa, modelo MO 2250 DC, sendo posicionado o protótipo a uma distância de 30 m da linha de transmissão e a uma altura de 1 m sobre o nível do solo, avançando 5 m de cada vez até chegar ao eixo das linhas. Esta linha de transmissão passa pelo campus da

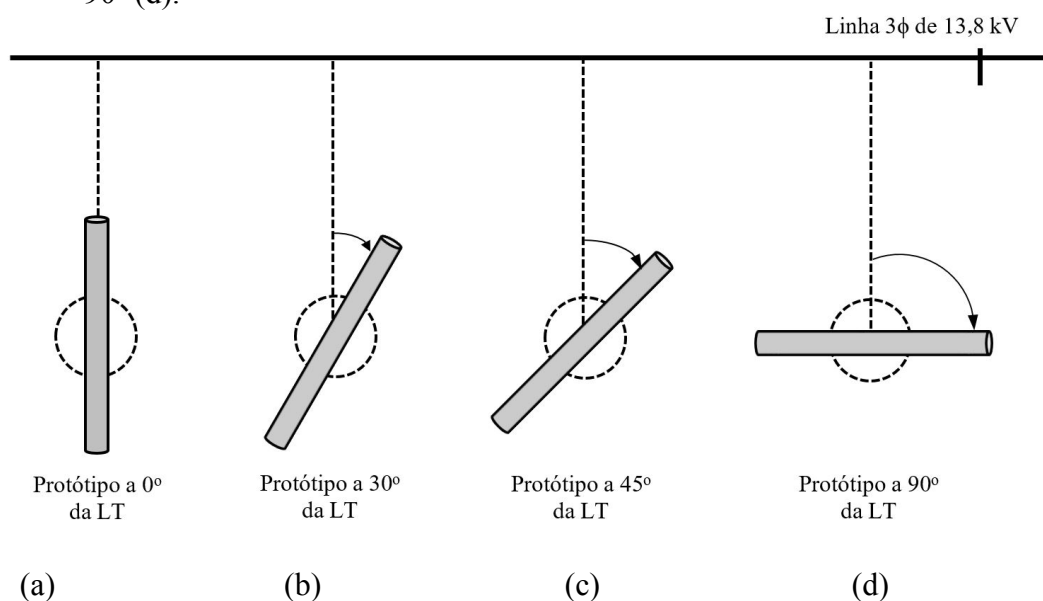
Universidade Federal de Rondônia, num local próximo a ela. O local ofereceu a possibilidade de energizar o osciloscópio, ter abrigo frente a descargas atmosféricas, proteção contra as precipitações pluviais e está afastado de qualquer interferência gerada por equipamentos climatizadores de ambiente. As condições ambientais no decorrer da realização das leituras foram: temperatura 35 °C e umidade relativa de 86%. O protótipo foi posicionado a uma altura de 1 m do nível do chão, apoiado num tripé de madeira com o intuito de minimizar a interferência nas medições, seguindo a recomendação da IEEE Std 644 (IEEE, 1995a) que estabelece os procedimentos para realizar medições com linhas aéreas de transmissão de energia elétrica alternada.

Com relação aos horários do levantamento dos níveis, eles foram efetuados de segunda a sexta feira, das 16:45 às 17:15 horas, sendo reposicionados para cobrir os demais pontos. Foram desconsideradas as leituras nos dias de precipitação pluvial para evitar quaisquer incidentes com descargas atmosféricas.

6.6 TESTES DE DIRETIVIDADE *IN LOCO*

O protótipo foi levado até a proximidade de uma linha de distribuição de 13,8 kV para verificar a diretividade. Posicionou-se o protótipo a uma distância de 20 m do eixo da linha e a uma altura de 1 m acima do solo. O protótipo realizou leituras do campo seguindo as manobras mostradas na Figura 6.9.

Figura 6.9 - Posicionamento do protótipo frente a linha de transmissão de 13,8 kV apoiado sob uma base girante e realizando leituras em 0° (a), 30° (b), 45° (c) e, finalmente em 90° (d).



Fonte: Autor.

6.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A linha selecionada para os testes foi selecionada por ter uma corrente circulante relativamente baixa comparada com os valores de LT de tensões maiores, permitindo uma interessante avaliação do protótipo para detecção de baixos níveis de densidade de fluxo magnético para a distância estabelecida na pesquisa. Nota-se que nos terminais do solenoide existe uma estreita dependência da tensão com a geometria e materiais utilizados que podem ser melhorados e reduzidos em tamanho.

Atribui-se aos amplificadores do circuito compacto com poucos componentes e baixo consumo energético, na ordem dos 20,3 mW, o que foi usado para condicionar o sinal apresentado nos levantamentos de campo que monitorado.

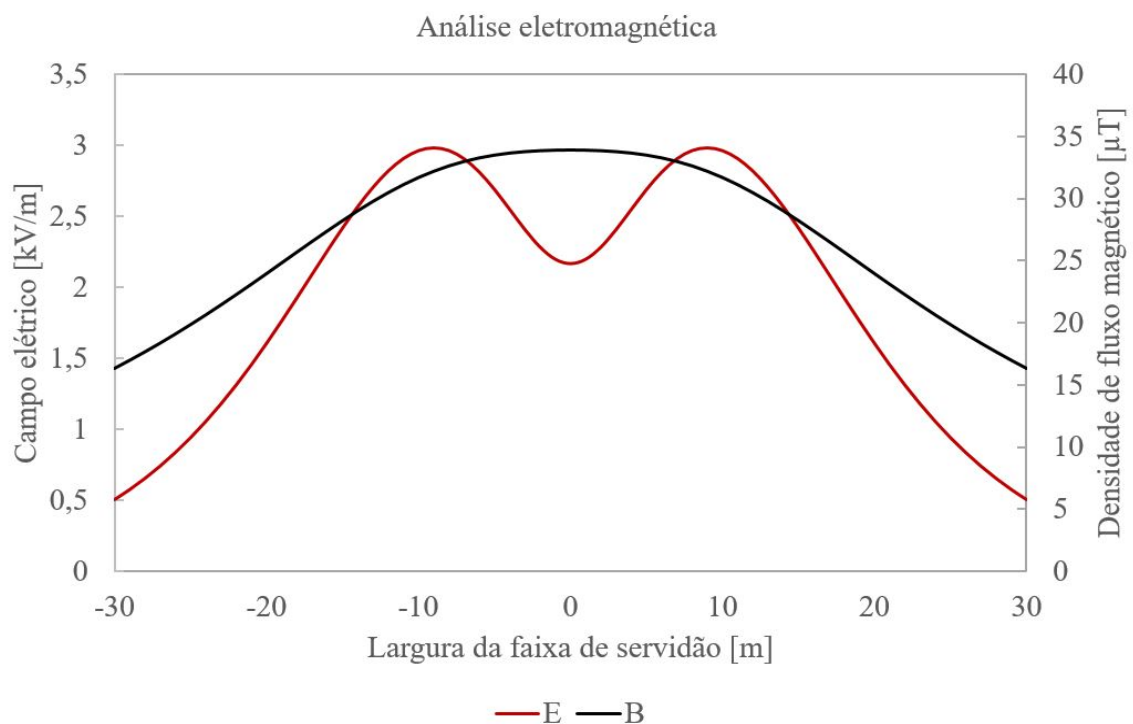
7 SIMULAÇÕES E RESULTADOS FINAIS

Neste capítulo apresentam-se os resultados das simulações do diagrama de radiação da linha de transmissão que foram obtidos ao longo dos trabalhos experimentais para esta tese. Na simulação foi utilizado o software (Elektrus) desenvolvido pelo grupo de pesquisas em Modelagem de Sistemas Elétricos do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Rondônia - UNIR o qual utiliza o método da simulação de cargas, usando uma descrição similar para linhas de transmissão de 69 kV e 230 kV (SANTOS Jr, 2011). Simulou-se com a ferramenta PDEtool do Matlab que utiliza o método de elementos finitos para representar o campo magnético gerado pelas linhas condutoras. Também foi utilizado o HFSS da Ansoft para demonstrar a diretividade do protótipo.

7.1 SIMULAÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para uma a linha de transmissão a 230 kV pode-se observar na Figura 7.1 os níveis atingidos de radiação dentro da faixa de servidão a uma altura de 1 m do solo, e os níveis atingidos pelos campos elétrico (linha vermelha) e magnético (linha preta).

Figura 7.1 - Níveis dos campos elétrico (linha vermelha) e magnético (linha preta) gerados dentro da faixa de servidão a uma altura de 1 m

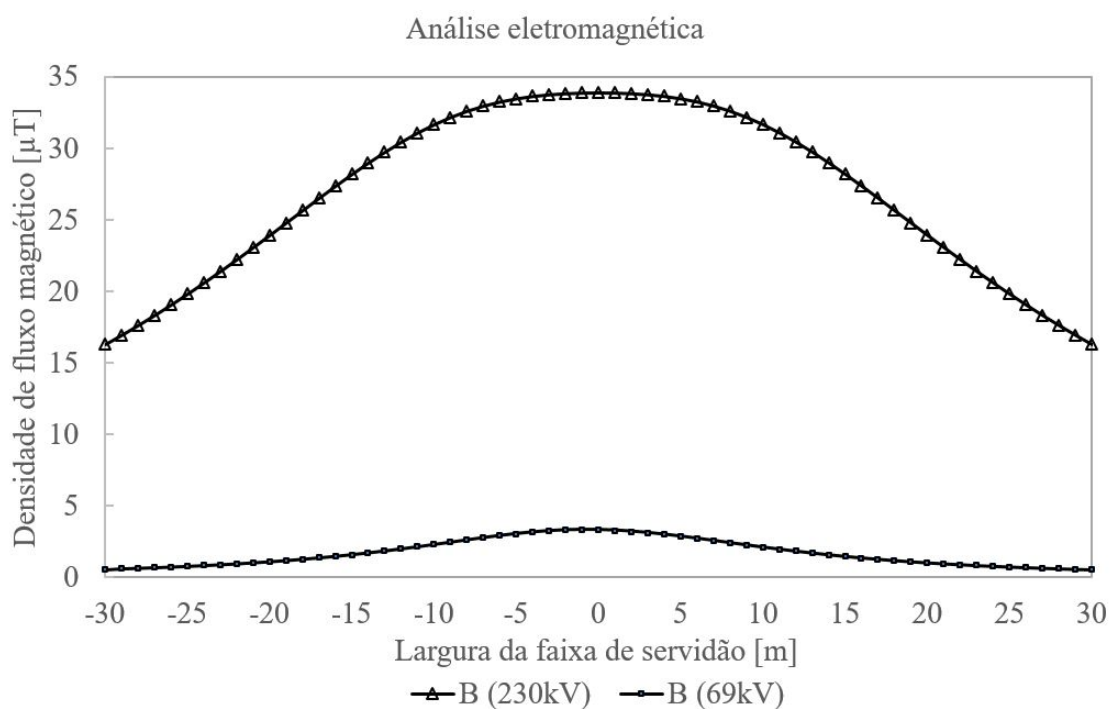


Fonte: Autor.

Os níveis dos campos elétricos são obtidos na linha imaginária que passa perpendicular ao vão central entre as torres que sustentam os cabos.

Ao simular a densidade de fluxo magnético para duas linhas de transmissão levou-se em conta que a corrente que é transportada pela LT de 69 kV é menor que da LT de 230 kV, como pode ser observado na figura 7.2, usando os parâmetros obtidos por Fuchs (1977), onde na marca de 0 m tem-se o ponto central de passagem das 3 fases.

Figura 7.2 - Níveis dos campos gerados para as linhas de transmissão de 69 kV e 230 kV

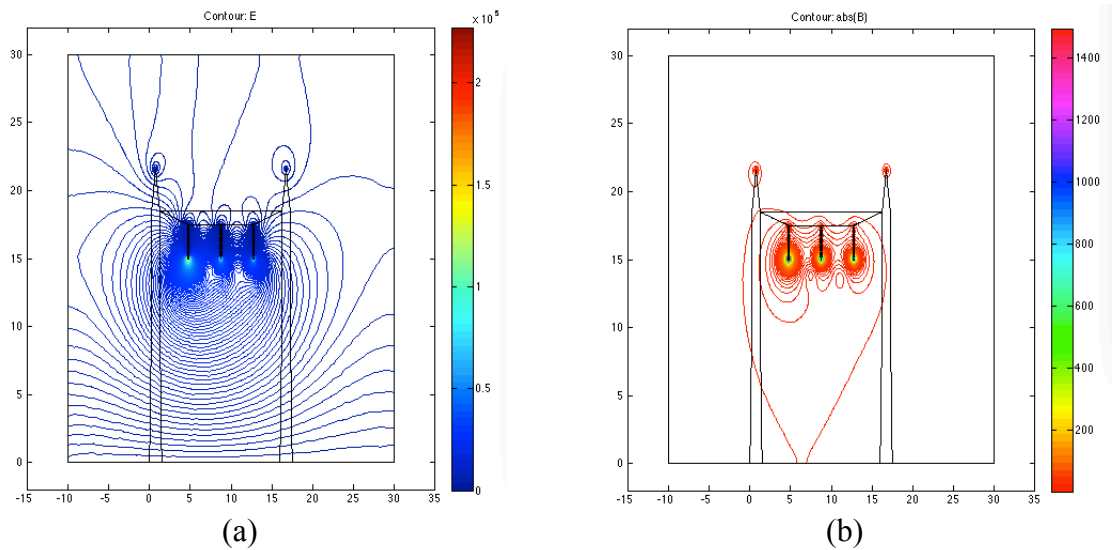


Fonte: Autor.

Com o PDEtool do Matlab foi simulada a representação no plano transversal que contém os condutores na região conhecida como a Barra da SE. Na Figura 7.3 pode ser observado o plano da barra com as três fases com a saída da linha.

A distribuição das linhas do campo elétrico em (a) ficam espalhadas no em torno delas, com os dois pontos de para-raios na parte superior. Em (b) está representada a densidade de fluxo magnético produzido pelos condutores na Barra através de linhas equipotenciais.

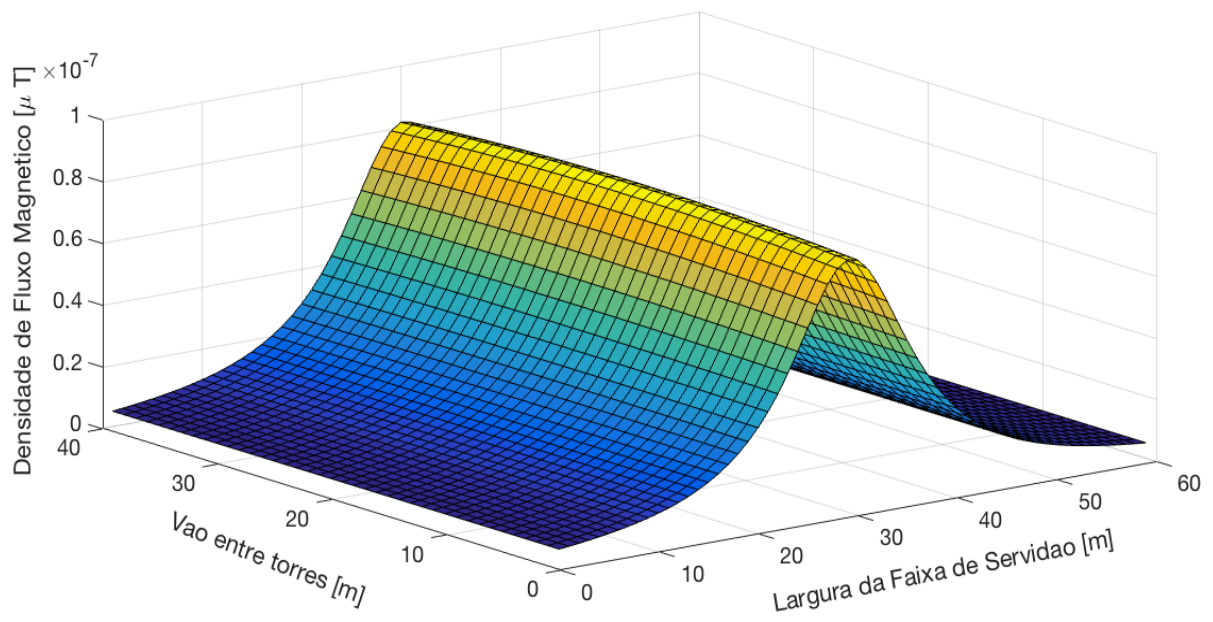
Figura 7.3 - Representação das superfícies equipotenciais dos campos elétrico (a) e magnético (b) gerados no em torno da Barra da subestação



Fonte: Autor.

A Figura 7.4 mostra os resultados da simulação obtida com a ferramenta Elekrus após a modificação dos parâmetros para analisar uma linha de distribuição de 13,8 kV com 100 A. O diagrama contém valores a partir do ponto zero devido a limitações do Matlab. Por simetria, pode-se tomar o valor inicial com o valor no ponto 60 do eixo da largura da faixa de servidão.

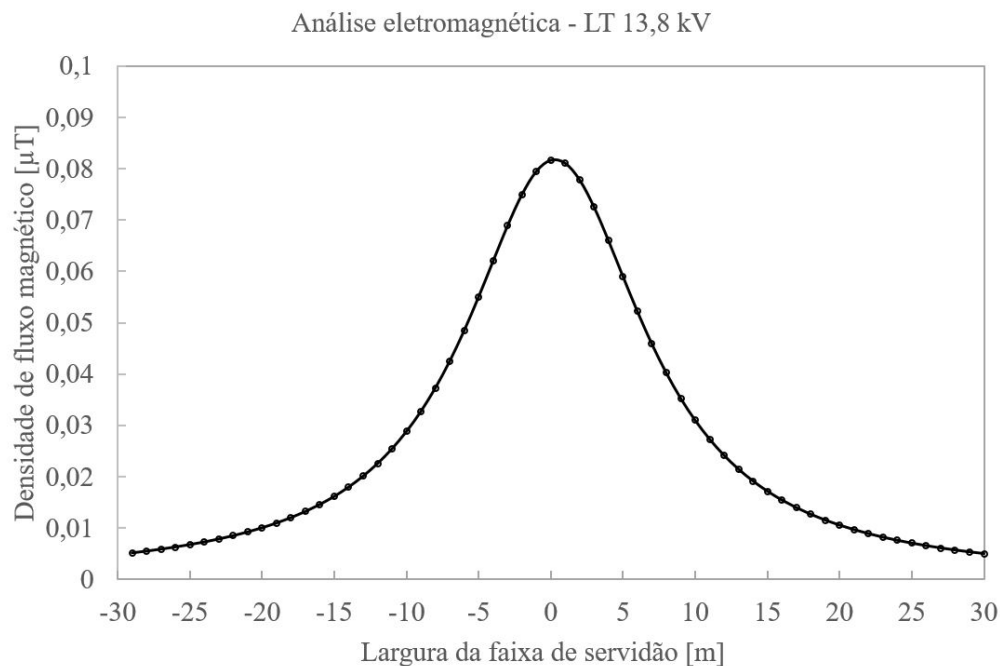
Figura 7.4 - Diagrama 3D do campo magnético para uma linha de distribuição de 13,8 kV com uma corrente de 100 A



Fonte: Autor.

Na Figura 7.5, pode-se observar os níveis da densidade do campo magnético, num corte transversal, considerando uma faixa de servidão de 60 m considerada segura. O nível de campo máximo é atingido no eixo que une as duas torres, na posição de 30 m.

Figura 7.5 - Níveis do Campo Magnético para uma linha de 13,8 kV



Fonte: Autor.

7.2 SIMULAÇÕES DA ESTRUTURA IMPLEMENTADA

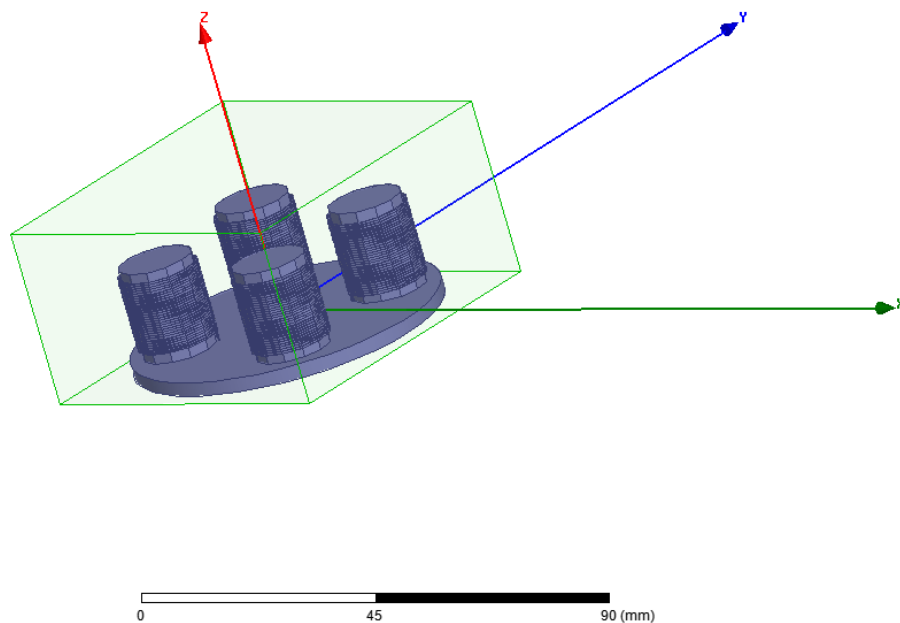
Para verificar o comportamento da estrutura de medição, foram realizadas diversas simulações. O software selecionado foi o HFSS da Ansoft que possui uma maior facilidade para projetar antenas, mas com maiores requerimentos de hardware para executar as rotinas. Assim, utilizando um computador compatível com 8 núcleos, 28 Gb de RAM, com sistema operacional Windows, versão 10, e com espaço livre em Disco de 15 Gb, para poder armazenar a enorme quantidade de valores dos resultados obtidos pelo programa.

Na Figura 7.6 pode-se observar a parte interna da estrutura do protótipo que foi simulada. Os 4 solenoides foram conectados em paralelo com o intuito de melhorar a sensibilidade à densidade do fluxo magnético incidente. As bases foram usinadas num polímero de aproximadamente 1,8 cm de espessura com furos para apoiar as barras de ferro.

Utilizou-se uma tensão de excitação de 1 V com uma frequência central de 60 Hz, de acordo com a lei da reciprocidade, para que o diagrama de radiação da antena transmissora seja similar ao diagrama da antena receptora. Sob essa condição pretendeu-se observar a diretividade do conjunto da estrutura embora não tenha sido considerada uma antena de recepção.

A simulação iniciou com um número de espiras igual a 10 que foi incrementado de 10 em 10 até atingir 250. Verificou-se que após esse número de espiras, os recursos computacionais não eram suficientes para finalizar uma simulação com sucesso.

Figura 7.6 – Detalhe interno da estrutura a ser montada com 4 barras e 50 espiras em cada barra, enroladas em sentidos de tal forma a somar as suas contribuições de campo gerado



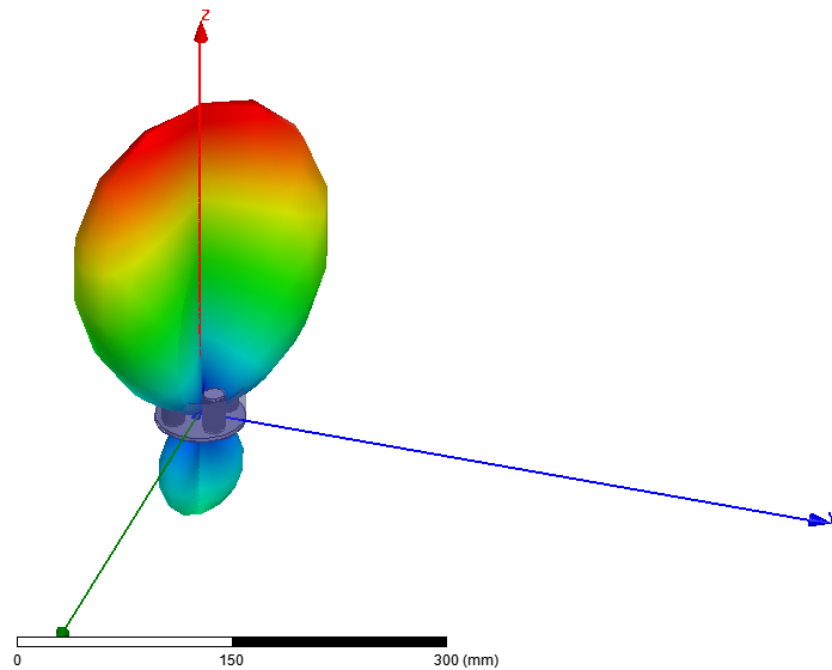
Fonte: Autor.

Na Figura 7.7 pode ser observado o diagrama de radiação do campo gerado em torno da estrutura montada. Nesta representação tem-se um lóbulo principal alinhado com o eixo central da estrutura. Este eixo é dirigido à linha de transmissão fazendo um ângulo de 0° com a perpendicular à linha imaginária que uniria as duas torres de transmissão como mencionado na metodologia.

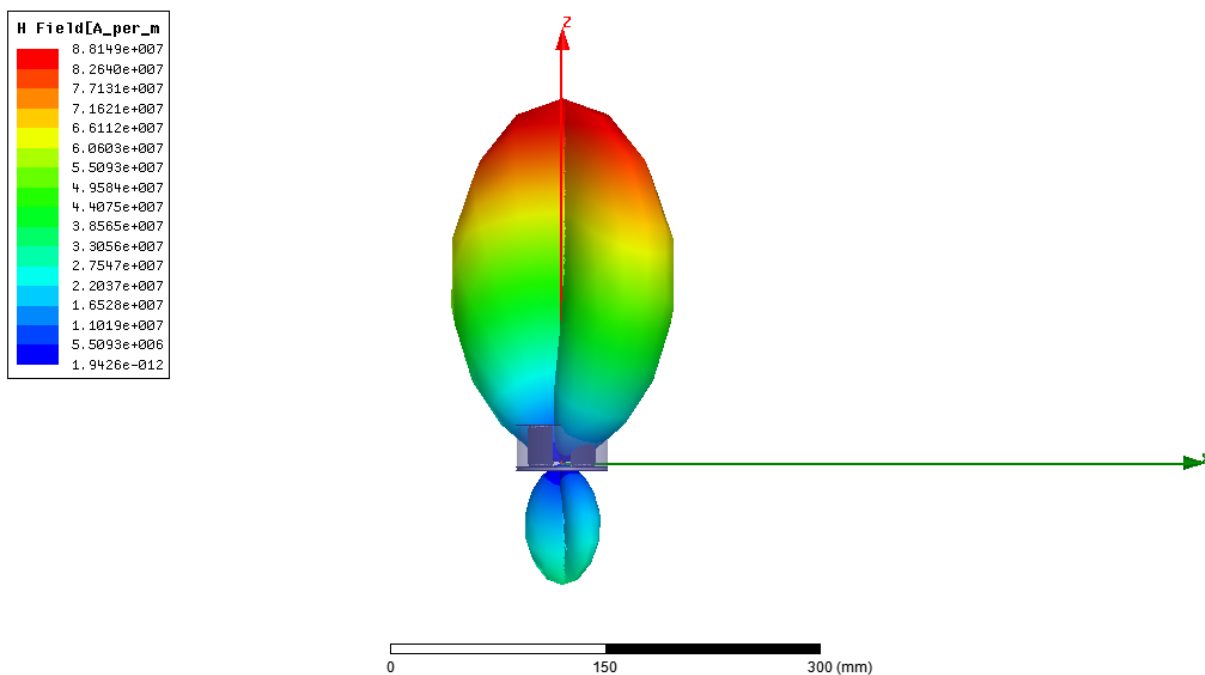
A diferença dos lóbulos frontal e traseiro no protótipo é justificado porque a estrutura possui uma placa condutora aterrada na base, enquanto que aquela que gera o lóbulo principal não possui na sua base material ferromagnéticos que possa alterar de forma significativa o

lóbulo frontal. O diagrama da Figura 7.7 apresenta uma forma com pouca simetria produzida por erros de condutividade dos aterramentos não considerados na construção.

Figura 7.7 – Diagrama de radiação do campo gerado pela estrutura. Em (a) a representação da diretividade e em (b) uma representação simbólica da intensidade do campo magnético gerado



(a)



(b)

7.3 RESULTADOS

A Figura 7.8 mostra o protótipo de medidor de campos eletromagnéticos posicionado a zero grau (a) e 30 graus (b). Na parte superior dela, pode-se observar a linha de 13,8 kV. Esta linha de transmissão passa paralela ao perímetro do campus da universidade UNIR.

Figura 7.8 - Posição do protótipo na proximidade da linha. Em (a) a posição inicial do protótipo, considerada perpendicular à linha de 13,8 kV. Em (b), o protótipo ficou posicionado a 30° da posição inicial girando no sentido horário.



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Pode-se observar nas fotografias da Figura 7.8 que o protótipo foi instalado em um espaço aberto, sem construções ou equipamentos em funcionamento, o que evitou interferências nas leituras.

Nas Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 são apresentados os dados levantados nos horários indicados. Os dados a seguir, organizados em tabelas, representam as leituras obtidas ao girar o protótipo de 0, 30, 45 e 90 graus na direção perpendicular à linha de transmissão, tal como pode ser observado na Figura 6.9 e na Figura 7.8.

Na tabela 7.1 são observadas duas sequências de leituras indicadas como Leitura I e II, pois cada leitura foi repetida no ângulo determinado. Pode-se observar que foram obtidas amplitudes maiores para os ângulos descritos entre 0 e 30 graus.

Tabela 7.1 - Leituras realizadas das 16:40 às 16:45

Leitura	Ângulo	V_{pp} [mV]	V_{ef} [mV]	f [Hz]	Leitura	Ângulo	V_{pp} [mV]	V_{ef} [mV]	f [Hz]
	0°	244	86,4	59,88		0°	236	83,41	60,24
I	30°	214	76,53	60,24	II	30°	238	83,82	60,24
	45°	174	61,03	60,24		45°	216	76,37	59,88
	90°	174	61,32	69,88		90°	154	54,77	59,88

Fonte: Autor.

Na tabela 7.2 foram obtidas maiores amplitudes próximos do ângulo zero.

Tabela 7.2 - Leituras realizadas das 16:50 às 16:55

Leitura	Ângulo	V_{pp} [mV]	V_{ef} [mV]	f [Hz]	Leitura	Ângulo	V_{pp} [mV]	V_{ef} [mV]	f [Hz]
	0°	100	34,80	60,24		0°	146	51,40	59,88
I	30°	76	26,93	59,88	II	30°	156	55,39	59,98
	45°	96	36,76	59,88		45°	172	60,31	59,88
	90°	96	33,80	50,98		90°	114	41,38	59,52

Fonte: Autor.

Note-se na Tabela 7.3 que foram obtidos maiores níveis de amplitude de tensão para os ângulos de 0 e 30 graus.

Tabela 7.3 - Leituras realizadas das 17:00 às 17:00

Leitura	Ângulo	V_{pp} [mV]	V_{ef} [mV]	f [Hz]	Leitura	Ângulo	V_{pp} [mV]	V_{ef} [mV]	f [Hz]
I	0°	182	65,03	60,24	II	0°	204	62,82	60,24
	30°	176	62,29	60,24		30°	154	55,43	60,24
	45°	168	58,90	59,88		45°	134	46,77	59,88
	90°	156	53,31	59,88		90°	130	46,71	59,88

Fonte: Autor.

Por último, na Tabela 7.4, observa-se na primeira sequência, uma variação no comportamento das amplitudes com relação ao ângulo do protótipo. Mas na sequência seguinte, aparece uma diminuição de amplitudes segundo o reposicionamento que já era esperado para o protótipo.

Tabela 7.4 - Leituras realizadas das 17:10 às 17:15

Leitura	Ângulo	V_{pp} [mV]	V_{ef} [mV]	f [Hz]	Leitura	Ângulo	V_{pp} [mV]	V_{ef} [mV]	f [Hz]
I	0°	162	57,79	59,88	II	0°	200	71,99	59,88
	30°	70	24,48	60,24		30°	150	53,77	59,88
	45°	150	52,82	59,88		45°	128	45,32	60,24
	90°	172	61,40	59,88		90°	120	41,61	59,88

Fonte: Autor.

Posteriormente, foram realizadas leituras numa LT de 230 kV. A distância entre as torres é de 350 m. Posicionando-se o protótipo de medidor no ponto médio e afastando-se

ortogonalmente, seguiu-se o esquema mostrado na Figura 6.9 (Capítulo 6). Na Figura 7.9 pode ser observada a primeira marca de medição ou marca “0”.

Figura 7.9 - Posição da primeira marca no eixo de uma LT de 230 kV



Fonte: Autor.

Na Figura 7.10 podem ser observadas as marcas de posicionamento do protótipo a intervalos de 5 m cada.

Figura 7.10 - Posicionamento das marcas para medição da densidade de fluxo magnético da LT de 230 kV



Fonte: Autor.

Iniciando as medidas de campo desde o eixo como ponto “0”, sendo as seguintes marcas posicionadas a cada 5 m. Na Figura 7.11 mostra-se o posicionamento do protótipo numa das marcas de medição. O campo foi posicionado a 1 m de altura, seguindo o IEEE Standard 644 (IEEE, 1994).

Figura 7.11 - Protótipo posicionado pelo pesquisador na marca pré-estabelecida



Fonte:

Autor.

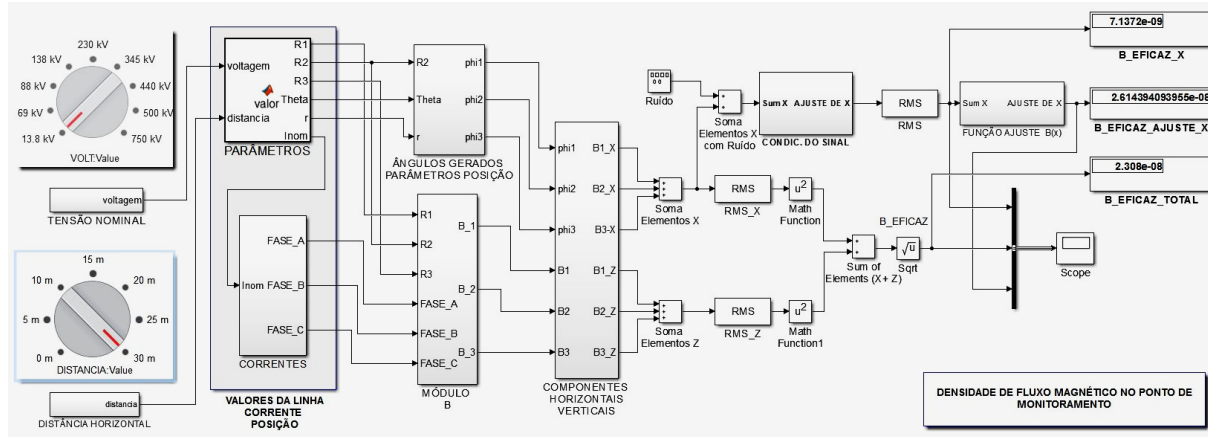
A leitura da densidade de fluxo magnético foi realizada no período de baixa carga da LT, mas obtendo os dados da corrente circulante em cada fase com os quais foi possível determinar teoricamente os níveis do campo.

7.4 IMPLEMENTAÇÃO NO SIMULINK

A Figura 7.12 contém os blocos do Simulink dentro dos quais foram inseridas as equações da seção 4.5. Na interface, foram selecionadas a tensão da LT e a distância do ponto de observação tendo como referência o ponto médio da linha imaginária que uniria as duas torres, desde o ponto médio como foi mostrado na Figura 6.8. Nessa interface foram calculados: o valor eficaz da densidade de fluxo magnético total, o valor eficaz da componente x e a

implementação de uma aproximação para calcular a densidade de fluxo total tendo como entrada o valor eficaz da componente x . Cada bloco é descrito no Apêndice A.

Figura 7.12 – Interface dos blocos implementados no Simulink



Fonte: Autor

7.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 7.5 apresenta os níveis dos campos obtidos para uma linha de distribuição de 13,8 kV. Na primeira coluna mostra-se a distância entre o ponto de observação e a linha imaginária que passa pelas torres, sendo esta a referência do ponto central. Na segunda coluna, os valores foram obtidos por meio do Programa Elektrus. Na terceira coluna foram identificadas pelo Simulink B_Eficaz_X os níveis da componente X do campo magnético. Na quarta coluna consta o resultado de uma função de aproximação para determinar o valor total do campo que é mostrado na quinta coluna. A sexta coluna, lista o nível da componente X do campo magnético medido pelo EM-8000. Na última coluna pode ser observado o nível do campo obtido por meio do protótipo implementado.

A Figura 7.13 mostra os gráficos dos níveis da densidade de fluxo magnético apresentados na Tabela 7.5. Pode-se observar em vermelho, a representação das leituras através do medidor EM-8000, que é considerada como referência. Os cálculos teóricos realizados pelo Elektrus seguem a tendência dos níveis obtidos pelo medidor.

Os resultados obtidos pela implementação no Simulink apresentam uma variação nos primeiros 5 m de afastamento da linha, mas continuam acompanhando a tendência da curva gerada pela referência, como resultado da menor contribuição da componente X, na proximidade da linha.

Na Figura 7.14 estão plotadas as curvas geradas pelo medidor de referência e pelo protótipo implementado. Pode-se observar a tendência inicial nos primeiros metros afastados da referência. Nesses 5 primeiros metros, a componente X, que é paralela ao eixo do protótipo, apresentou valores pouco significativos, o que é devido à proximidade do protótipo. A partir do quinto metro, o protótipo acompanhou a tendência do medidor de referência.

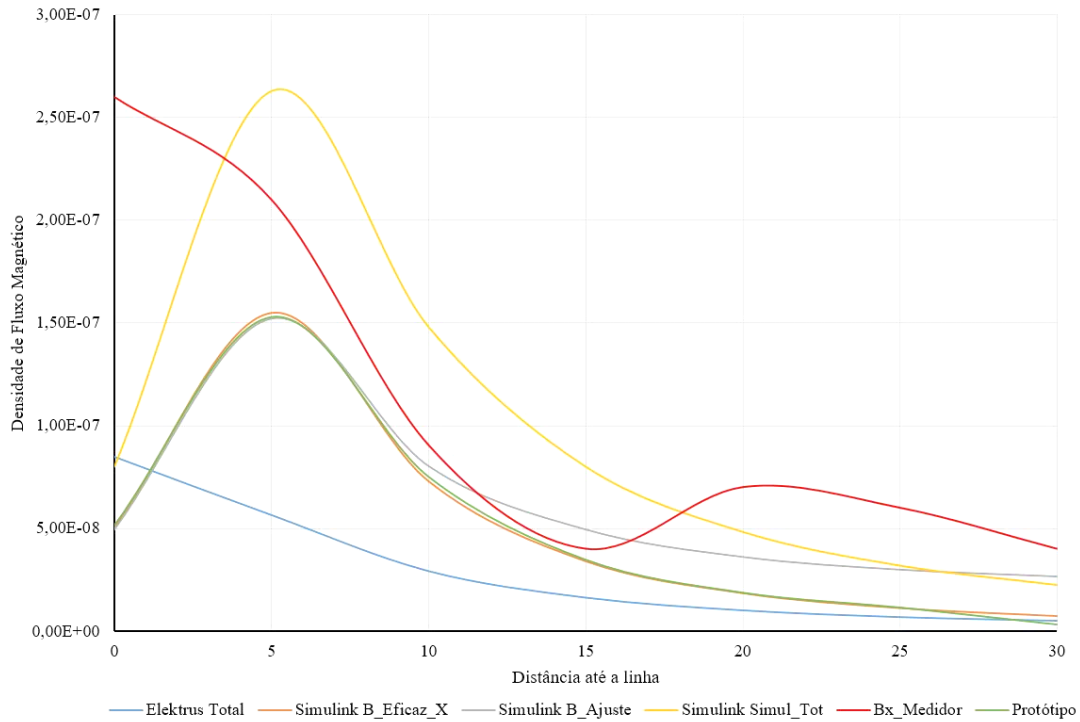
Tabela 7.5 -Comparativo entre os níveis obtidos através dos métodos utilizados e os valores obtido no protótipo

Dist [m]	Elektrus Total [T]	Simulink B_Eficz_X [T]	Simulink B_Ajuste [T]	Simulink Simul_Tot [T]	Bx Medidor [T]	Protótipo [T]
0	8,47E-08	5,05E-08	4,94E-08	8,03E-08	2,60E-07	5,15E-08
5	5,64E-08	1,55E-07	1,52E-07	2,63E-07	2,100E-07	1,53E-07
10	2,92E-08	7,30E-08	8,03E-08	1,48E-07	9,05E-08	7,50E-08
15	1,63E-08	3,42E-08	4,94E-08	8,03E-08	4,000E-08	3,46E-08
20	1,01E-08	1,86E-08	3,60E-08	4,85E-08	7,00E-08	1,86E-08
25	6,77E-09	1,14E-08	2,98E-08	3,20E-08	6,000E-08	1,14E-08
30	5,01E-09	7,54E-09	2,65E-08	2,26E-08	4,00E-08	3,09E-09

Fonte: Autor

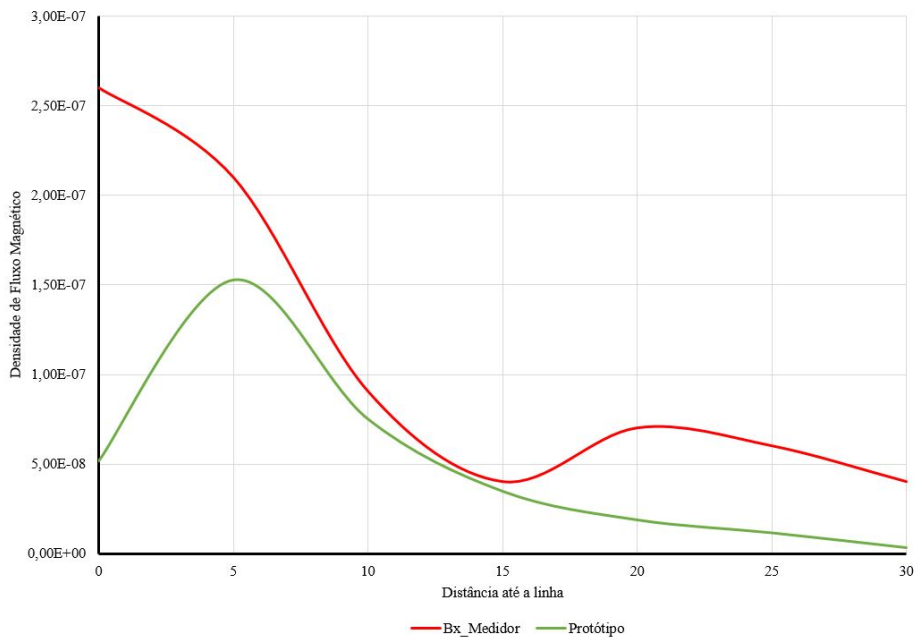
A Tabela 7.5 sugere uma limitação para as medidas obtidas nas proximidades da linha, tendo porém, com um melhor comportamento após esse ponto de observação.

Figura 7.13 – Resultados obtidos por meio dos métodos implementados.



Fonte: Autor

Figura 7.14 – Comparação entre o medidor e o protótipo



Fonte: Autor

7.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são tabelados os resultados obtidos ao se posicionar o protótipo de medidor de campos magnéticos em diferentes ângulos confirmando que a tensão obtida a zero grau em relação ao centro da linha é apropriada para ser utilizada na equação (6.2). Foram tabelados os dados de campo magnético obtidos com as simulações gráficas e os resultados teóricos práticos obtidos na pesquisa de campo. Conclui-se que a aproximação implementada no Simulink para determinação do campo magnético de uma linha de transmissão pode ser considerada apenas para distâncias maiores do que 10 m. Os valores obtidos pelo protótipo mostram uma interessante aproximação uma vez passados os 5 metros, que podem ser corrigidos num estágio seguinte realizado através de técnicas de processamento digital de sinais.

8 CONCLUSÕES

- A implementação de um protótipo de monitoramento remoto da densidade de fluxo magnético em torno de uma linha de transmissão é possível com a utilização de materiais facilmente encontrados no mercado.
- As dimensões do protótipo podem ser reduzidas e ainda assim, ter mantidas medidas precisas com a utilização de núcleos com materiais de maior permeabilidade magnética. Isto pode ser observado nas equações (6.2) e (6.9).
- A escolha de um único eixo horizontal na estrutura de captação do campo magnético fundamentou-se na segurança contra descargas atmosféricas e no alto nível de campo elétrico existente no meio. Observa-se que a região onde foram realizados os testes apresenta um alto índice (9) de descargas atmosféricas (ONS, 2015) o que determinou a implementação do protótipo mantida paralelo com a superfície do solo.
- A simulação do campo magnético em torno de um condutor foi realizada no Simulink do Matlab fornecendo uma interessante aproximação da densidade de campo magnético existente. Considerando que, a densidade de campo toma como referência a corrente nominal e alguns poucos detalhes das características físicas dos cabos, este estudo limitou-se ao espaçamento do arranjo dos condutores e a altura suportada pelas 3 fases do circuito.
- A ferramenta desenvolvida no Simulink pode ser facilmente atualizada com dados pertinentes as correntes e tensões existentes.
- A exatidão dos cálculos do campo existente pode ser melhorada com informações provenientes do TC da subestação, o que permitirá avaliar melhor o campo magnético produzido pela corrente que está circulando em tempo real pela LT.
- O ambiente utilizado para a adequada calibração do protótipo poderia ser melhorado, minimizando-se a interferência de outros equipamentos elétricos que possam estar ativos durante o procedimento.
- A sensibilidade do protótipo construído foi limitada às condições laboratoriais existentes, mas mesmo assim suficientes para estabelecer os principais pontos desta tese.
- Os níveis dos sinais adquiridos com o medidor de campo magnético otimizado de densidade de fluxo magnético podem ser facilmente transmitidos via um módulo de

comunicação de dados a um local remoto minimizando a exposição das equipes de avaliação às altas tensões das linhas e aos fenômenos atmosféricos.

8.1 DISCUSSÃO

- A simulação no HFSS para determinar a diretividade do protótipo foi suspensa devido aos recursos disponíveis de hardware. Entretanto, foram simuladas até 250 espiras por núcleo, sendo estas suficientes para os resultados desta tese.
- Inicialmente, tentou-se reproduzir as características físicas do protótipo idealizado, mas observou-se, que o tempo de processamento à medida que era incrementado o número de espiras poderia ser maior do estimado.
- As barras de ferro não são exatamente cilíndricas, pois optou-se por barras dodecagonais para as simulações. A estrutura para simulação foi construída com uma série de cuidados, entre eles pode-se citar o critério de não se misturar os materiais usados com os das adjacências.

8.2 CONTRIBUIÇÕES

O autor acredita que tenha contribuído para o monitoramento continuado da densidade de fluxo magnético produzido pelas linhas de transmissão baseado nos seguintes aspectos:

- Implementação de um protótipo de medidor de campo magnético em torno de linhas de transmissão capaz de fornecer sinais que podem processados por um circuito embarcado;
- Estabelecimento de uma relação de correspondência entre o sinal gerado e a densidade de fluxo magnético radiado pela linha de transmissão;
- Estabelecimento de procedimentos de calibração do protótipo para leitura dos níveis de densidade de fluxo magnético em linhas de transmissão;
- Reduzir a exposição do público ocupacional à exposição da densidade de fluxo magnético gerado pelas linhas de transmissão de alta tensão pela possibilidade de transmissão dos dados obtidos pelo protótipo proposto via um módulo comercial de comunicação de dados com um local remoto e de mais conveniência para armazená-los.

8.3 TRABALHOS FUTUROS

Pode-se sugerir para continuar este trabalho:

- Usar circuitos embarcados para implementar as rotinas de cálculo que determinam a densidade de fluxo existente, o controle do posicionamento; amostragem e armazenamento dos dados obtidos para processamento e transferência de dados para o supervisor. A transferência será realizada utilizando módulos wireless de comunicação XBee Pro;

- Reforçar a segurança dos dados, caso a comunicação não seja alcançada com sucesso, o medidor pode armazenar os dados em um cartão de memória, possibilitando a recuperação das informações ao final de cada período de 8 horas, seguindo a metodologia de Munteaneu e colaboradores (2011);

- Reduzir as dimensões da estrutura porque a tensão induzida em cada solenoide é proporcional à permeabilidade magnética do material utilizado no núcleo, podendo ser substituído por outros materiais como o permalloy, cuja constante elétrica é maior do que a utilizada no protótipo desta tese. Isto pode reduzir o tamanho e o peso da estrutura, facilitando o seu transporte.

- Caso possa ser implementado um mecanismo de posicionamento para sinalizar a maior intensidade de campo no meio, seria interessante aplicar uma malha de controle que evite o reposicionamento frequente, devido a inércia e a remanência magnética dos solenoides.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5422**: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR15415**: Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 e 60 Hz. Rio de Janeiro, v. 50, p. 56, 2006.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa no. 398. Regulamenta a Lei no. 11.394, de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão. **Diário Oficial [da] União**, p. 70-71, 2010.

_____. Altera a Resolução Normativa no. 398, de 23 de março de 2010, que regulamenta a Lei no. 11.934, de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originári. **Diário Oficial [da] União**, p. 68, 2014.

BARSAM, T. et al. Effect of extremely low frequency electromagnetic field exposure on sleep quality in high voltage substations. **Iranian journal of environmental health science & engineering**, v. 9, n. 1, p. 15, 2012.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. [s.l.] Ed. da UFSC, 2012.

BEGOVIC, M. Trends in power system wide area protection. Power Systems Conference and Exposition, **Anais...** 2004. IEEE PES, 2004.

BRASIL. Lei n. 11.934, de 5 de maio de 2009. Dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos; altera a Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] União**, p. 1-3, 2009.

CHARI, M. V. K.; SALON, S. **Numerical methods in electromagnetism**. San Diego: Academic press, 2000.

CIGRE. Mitigation techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems. Technical Brochure CIGRE. **Conseil International des Grands Réseaux Électriques**, 2009a.

_____. Technical guide for measurement of low frequency electric and magnetic fields near overhead power lines. Technical Brochure CIGRE. **Conseil International des Grands Réseaux Électriques**, 2009b.

CUI, Y. et al. Exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields inhibits T-type calcium channels via AA/LTE4 signaling pathway. **Cell calcium**, v. 55, n. 1, p. 48-58, 2014.

DENO, D. W. Transmission line fields. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. 95, n. 5, p. 1600-1611, 1976.

DENO, D. W.; ZAFFANELLA, L. E. Field effects of overhead transmission lines and stations. In: **Transmission Line Reference Book**. 2nd. ed. Palo Alto, California, USA: EPRI, 1982. p. 329-420.

EU. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), (1999/519/EC). **Official Journal of the European Union**, p. L199/59--L199/70, 1999.

_____. Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 - on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from. **Official Journal of the European Union**, p. L159/01--L159/26, 2004.

FELDMAN, J. M. et al. A hotstick instrument for estimation of the potential of an HVDC conductor. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 7, n. 3, p. 1533-1541, 1992.

FESER, K.; GOCKENBACH, E. Distortion-free measurement of high impulse voltages. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 3, n. 3, p. 857-866, 1988.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro, RJ: LTC / EFEL, 1977. v. 2.

GERRARD, C. A.; GIBSON, J. R. Remote monitoring of conditions on high voltage power systems. Field Modelling: Applications to high voltage power apparatus, IEE Colloquium on. **Anais... IET**, 1996.

GUO, F.; HAYAT, H.; WANG, J. Energy harvesting devices for high voltage transmission line monitoring. **2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting**, v. 43210, p. 1-8, 2011.

HADDAD, A.; WARNE, D. **Advances in High Voltage Engineering: IET Power and Energy Series 40**. 2nd. ed. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2007.

HAMEYER, K.; MERTENS, R.; BELMANS, R. Numerical methods to evaluate the electromagnetic fields below overhead transmission lines and their measurement. Devices, Circuits and Systems, 1995., **Anais... Proceedings of the 1995 First IEEE International Caracas Conference on**. 1995.

HUERTAS, J. I.; BARRAZA, R.; ECHEVERRY, J. M. Wireless data transmission from inside electromagnetic fields. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 44, n. 2, p. 88-97, 2010.

IARC. **Working group on the evaluation of carcinogenic risks to humans and World Health Organization and International Agency for Research on Cancer. Non-ionizing Radiation: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields**. Lyon, France: World Health Organization, 2002. v. 80.

ICNIRP. ICNIRP statement on the "guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)". **Health Physics**, v. 74, n. 4, p. 494- 522, 1998.

ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz to 100 KHz). **Health Physics**, v. 99, n. 1, p. 112, 2010.

IDA, N.; BASTOS, J. P. A. Electromagnetics and calculation of fields. **Springer**, 1997.

IEEE. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines. Reaffirmed 2001, 2008. **IEEE Std 644-1994**, p. 1- 25, 1995a.

_____. IEEE Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters 10 Hz to 3 kHz. **IEEE Std 1308-1994**, 1995b.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Previsão de tempo para cidades**. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/cidades/tempo/238>>. Acesso em: 12 maio. 2017.

ISHII, M. et al. Improvement of formula and uncertainty of the reference magnetic field for AC magnetometer calibration. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 62, n. 6, p. 1443-1449, 2013.

JIA, H. The influence of extremely low-frequency magnetic field and magnetic nanoparticle on A β 40 aggregation in Vitro. **IEEE Transactions on Electromagnetics**, v. 51, n. 11, p. 2015, 2015.

JIN, J.-M. **Theory and computation of electromagnetic fields**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2010.

KHAWAJA, A. H. et al. **Estimation of current and sag in overhead power transmission lines with optimized magnetic field sensor array Placement** **IEEE transactions on magnetics**, 2017.

KOMAKI, A. et al. Effects of exposure to an extremely low frequency electromagnetic field on hippocampal long-term potentiation in rat. **Brain Research**, v. 1564, p. 1-8, 2014.

KRAJEWSKI, W. Numerical assessment of electromagnetic exposure during live-line works on high-voltage objects. **Science, Measurement & Technology, IET**, v. 3, n. 1, p. 27-38, 2009.

LATTARULO, F. **Electromagnetic compatibility in power systems**. [s.l.] Elsevier, 2011.

LIU, J. et al. Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis. Power System Technology, 2002. Proceedings. **Anais... PowerCon 2002**. International Conference on. 2002.

MARKOVSKI, B. et al. System for acquisition and analysis of low frequency magnetic fields in three axes. **International Journal of Emerging Sciences**, v. 1, n. 4, p. 615-624, 2011.

MUNTEANU, C. et al. Electric and magnetic field distribution inside high and very high voltage substations. **Anais... Proceedings of the 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Zurich 2009**. 2009.

MUNTEANU, C.; VISAN, G.; POP, I. T. Electric and magnetic field distribution inside high voltage power substations. Numerical modeling and experimental measurements. **IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, v. 5, n. 1, p. 40-45, 2010.

NASCIMENTO, C. E. M. **Modelagem em elementos finitos de dutos de aço reforçados por compósito de matriz polimérica**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

OLSEN, R. G.; EDWARDS, K. S. A new method for real-time monitoring of high-voltage transmission-line conductor sag. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 17, n. 4, p. 1142-1152, 2002.

OLSEN, R. G.; WONG, P. S. Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in

the vicinity of electric power lines. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 7, n. 4, p. 2046-2055, 1992.

ONS. Operador Nacional do Sistema. **Mapas de densidade de descargas atmosféricas**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>. Acesso em: 15 nov. 2016.

PAUL, C. R. Eletromagnetismo para Engenheiros - Com aplicações a sistemas digitais e interferência eletromagnética. **LTC**, Rio de Janeiro, 2006.

PINHO, A. C. **O cálculo do campo elétrico em 2D gerado por linhas de transmissão e o efeito em seres vivos**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 1994.

RADE, D. A. **Método dos elementos finitos aplicados à Engenharia**. Uberlândia, MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

ROSCOE, N. M.; M. D. J.; FRASER, L. A novel inductive electromagnetic energy harvester for condition monitoring sensors. **Anais... Proceedings of the 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis -CMD 2010**, Tokyo, Japan, September 6 -11,. Tokyo, 2010.

ROSCOE, N. M.; JUDD, M. D. Harvesting energy from magnetic fields to power condition monitoring sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 13, n. 6, p. 2263-2270, 2013.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de electromagnetismo**. 3th. ed. Porto Alegre, RG, Brasil: Bookman, 2004.

SAFIGIANNI, A. S.; TSOMPANIDOU, C. G. Electric-and magnetic-field measurements in an outdoor electric power substation. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 24, n. 1, p. 38-42, 2009.

SALKIC, H. et al. Calculation and measurement of electromagnetic fields. In: BASHIR, S. O. (Ed.). **Calculation and Measurement of Electromagnetic Fields**. [s.l.] INTECH Open Access Publisher, 2012. p. 298.

SANTOS, J. S. et al. A MatLab based software for measument of transmission line fields. **Anais... Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)**, 2011 IEEE PES. 2011.

SAVADJIEV, K.; FARZANEH, M. Modeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 19, n. 2, p. 715-721, 2004.

SAWADA, J. et al. A mobile robot for inspection of power transmission lines. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 1, p. 309-315, 1991.

SEPPA, T. O. A practical approach for increasing the thermal capabilities of transmission lines. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 8, n. 3, p. 1536-1550, 1993.

SILVA, R. M. DA. **Método numérico-analítico generalizado para estimação do campo eletromagnético de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando a teoria dos**

elementos finitos. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2010.

SKILLING, H. H. **Fundamentals of electric waves.** New York: John Wiley & Sons, 1948.

SONDOTÉCNICA. **Subestação Porto Velho I.** Disponível em: <<http://www.sondotecnica.com.br/cases.show.logic?cases.id=592>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. **Antenna theory and design.** [s.l: s.n.]. 2012.

SUN, X. et al. Noncontact operation-state monitoring technology based on magnetic- field sensing for overhead high-voltage transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 4, p. 2145-2153, 2013.

_____. Overhead high-voltage transmission-line current monitoring by magnetoresistive sensors and current source reconstruction at transmission tower. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 50, n. 1, 2014.

TOUSSAINT, K.; POULIOT, N.; MONTAMBAULT, S. Transmission line maintenance robots capable of crossing obstacles: State-of-the-art review and challenges ahead. **Journal of Field Robotics**, v. 26, n. 5, p. 477-499, 2009.

VILACHA, C. et al. Magnetic-field evaluation in the vicinity of high-voltage electric systems. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 27, n. 2, p. 980-985, 2012.

WHO. Environmental health criteria 238 Extremely low frequency fields. **World Health Organization**, n. 35, p. 519, 2007.

WIGGINS, C. M.; WRIGHT, S. E. Switching transient fields in substations. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 2, p. 591-600, 1991.

ZAFFANELLA, L. E. Electric and magnetic fields. In: **Transmission Line Reference Book: 200 kV and above.** 3rd. ed. Palo Alto, California, USA: EPRI, 2005. p. 7-118.

ZANGL, H.; BRETTERKLIEBER, T.; BRASSEUR, G. A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines. **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**, v. 58, n. 5, p. 1789-1796, 2009.

ZHU, M. et al. Alternative power sources for autonomous sensors in high voltage plant. **Anais... Electrical Insulation Conference**, 2009. EIC 2009. IEEE. 2009.

ZHU, M.; JUDD, M. D.; MOORE, P. J. Energy harvesting in substations for powering autonomous sensors. **Anais... Sensor Technologies and Applications**, 2009. SENSORCOMM'09. Third International Conference on. 2009.

APÊNDICE A - TEORIA ELETROMAGNÉTICA

Os aspectos da teoria eletromagnética apresentados neste anexo estão concentrados nos aspectos das cargas com movimento descontínuo ou corrente variante no tempo e consistem basicamente nas equações de Maxwell. As equações são estudadas através de sua forma diferencial ou integral. Essas relações definem as leis fundamentais do eletromagnetismo, nas quais se baseia a análise dos sistemas elétricos e fenômenos eletromagnéticos associados.

A.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL

As equações de Maxwell constituem um conjunto de equações diferenciais parciais, nas quais os vetores de campo são funções do tempo e de parâmetros espaciais x , y e z . Elas descrevem a natureza dos parâmetros distribuídos dos campos elétrico e magnético por todo o espaço e relacionam quatro importantes vetores de campo, que são apresentados na forma diferencial e integral, Tabela A.1.

Tabela A.1 – Equações de Maxwell

Lei	Forma Diferencial	Forma Integral	Eqs.
Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_c \vec{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$	(A.1)
Ampère	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_c \vec{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\mathbf{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{D} \cdot d\mathbf{S}$ $\oint_c \vec{H} \cdot d\mathbf{l} = i + \frac{\partial \psi}{\partial t}$	(A.2)
Gauss* (CE)	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	$\oint_s \vec{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho dv = q$	(A.3)
Gauss** (CM)	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_s \vec{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	(A.1)

*Lei de Gauss para o Campo Elétrico

**Lei de Gauss para o Campo Magnético

Fonte: (STUTZMAN; THIELE, 2013)

As equações da Tabela A.1 são relacionadas pelas equações a seguir:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{A.7})$$

onde:

$\vec{\mathbf{E}}$	campo elétrico $\left[\frac{\text{V}}{\text{m}}\right]$
$\vec{\mathbf{H}}$	campo magnético $\left[\frac{\text{A}}{\text{m}}\right]$
$\vec{\mathbf{D}}$	densidade de fluxo elétrico $\left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2}\right]$
$\vec{\mathbf{B}}$	densidade de fluxo magnético [T]
$\vec{\mathbf{J}}$	densidade de corrente elétrica $\left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2}\right]$
ρ	densidade linear de carga elétrica $\left[\frac{\text{C}}{\text{m}}\right]$
ϵ	permissividade
μ	permeabilidade
σ	condutividade

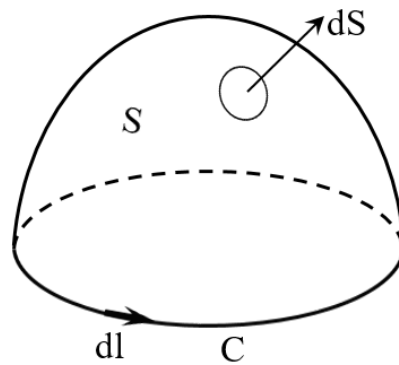
No espaço livre ter-se-á: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{H}}{\text{m}}\right]$ e $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{F}}{\text{m}}\right]$.

Em (A.1) pode-se observar que a variação de fluxo magnético cria uma força eletromotriz na espira que limita sua seção através da qual o fluxo criado variou. O sinal negativo decorre da Lei de Lenz: o sentido da corrente induzida tende a se opor à variação de fluxo que a originou. Esta lei é conhecida como a lei de Faraday e expressa que uma variação de indução magnética induz um campo elétrico, da mesma forma que uma distribuição de carga estática (SADIKU, 2004; SKILLING, 1948).

A (A.2) corresponde à Lei de Ampère ou Lei circuital de Ampère. A Lei de Ampère complementa a Lei de Faraday e afirma que uma variação da densidade de fluxo elétrico induz um campo magnético. Observa-se na forma integral desta equação, que os termos à direita da igualdade referem-se, respectivamente, às correntes de condução e de deslocamento, que são as correntes que atravessam a superfície S .

A (A.3) corresponde à Lei de Gauss para o campo elétrico. Esta equação define que o fluxo líquido de D através de uma superfície fechada S , como mostrado na Figura A.1, fornece a carga envolvida por aquela superfície ou contida num determinado volume V .

Figura A.1 - Superfície de integração



Fonte: Autor.

A (A.4) é a Lei de Gauss para o campo magnético a qual expressa que todas as linhas de campo magnético formam caminhos fechados onde não existem fontes isoladas de campo magnético. Em outras palavras, o fluxo magnético é conservativo para o campo magnético.

Pode-se observar que a densidade de corrente J pode existir sob condições onde σ é considerado nulo. Por exemplo, no vácuo, mas com carga elétrica livre e ρ se movendo com velocidade v , tem-se (A.8):

$$J = \rho v \quad (\text{A.8})$$

Em algumas situações, os materiais são tratados como possuidores de condutividade infinita, como por exemplo os supercondutores, ou cuja condutividade é muito alta, como é o caso do cobre, nos quais a densidade de corrente J pode ser controlada.

Sabendo que $\nabla \cdot \nabla \times H = 0$ e aplicando a operação divergente em (A.2), obtém-se (A.9):

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot D = 0 \quad (\text{A.9})$$

Substituindo (A.3) em (A.8) obtém-se a conhecida equação da continuidade de corrente.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{A.10})$$

Deve-se observar que a equação da continuidade é derivada do princípio de conservação da carga, e estabelece que numa região R limitada por uma superfície S , a taxa na qual a carga decresce é igual à taxa na qual sai a carga de R através de S .

Geralmente, os campos elétrico e magnético são relacionados pelas equações mencionadas de forma acoplada. Porém, para o estudo das linhas de transmissão de tensão alternada com frequência de operação em 50 ou 60 Hz, a análise considera o método de aproximação quase-estático ou com os campos desacoplados (BASTOS, 2012). Este método usa as equações de Maxwell, calculando separadamente os campos através de (A.11).

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (\text{A.11})$$

APÊNDICE B - FERRAMENTA DE CÁLCULO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO

CÓDIGO: BLOCO PARAMETROS

```
function [R1,R2,R3,theta,r, Inom] = valores(voltage, distancia)
r=1;
R1=1.1;
R2=1.1;
R3=1.1;
theta=pi/2;
Inom=80;
switch voltage
case 13800
    hcabo=6.5; % altura mínima segundo a norma NBR5422
    r = 0.2; % cabos dispostos em arranjo losangular
    angulo1=(hcabo-1)/(distancia + r); % cateto formado 5,5 m do protótipo com a linha
    theta1 = atan(angulo1);
    R2 = (distancia+r)/cos(theta1);
    R1= sqrt( (distancia)^2 + (hcabo-1)^2);
    R3= sqrt( (distancia-1)^2 + (hcabo-1)^2);
    Inom = 102; % CONFERIDO NA SUBESTAÇÃO DA CERON
    theta=theta1;
case 69000
    hcabo=6.5;
    r = 1.05; % 1.05m entre fases na horizontal
    angulo1=(hcabo-1)/(distancia + r); % cateto formado 5,5 m do protótipo com a linha
    theta1 = atan(angulo1);
    R2 = (distancia+r)/cos(theta1);
    R1= sqrt( (distancia)^2 + (hcabo-1)^2);
    R3= sqrt( (distancia-1)^2 + (hcabo-1)^2);
    Inom = 201; % para uma potência natural de 24MW
    theta=theta1;
case 88000
    hcabo=6.51;
    r = 1.1; % % distância entre fases dispostas na horizontal
    angulo1=(hcabo-1)/(distancia + r); % cateto formado 5,5 m do protótipo com a linha
    theta1 = atan(angulo1);
    R2 = (distancia+r)/cos(theta1);
    R1= sqrt( (distancia)^2 + (hcabo-1)^2);
    R3= sqrt( (distancia-1)^2 + (hcabo-1)^2);
    Inom = 200; % % % % % % % % % % conferir este valor
    theta=theta1;
case 138000
    hcabo=6.8;
    r = 1.6; % distância entre fases dispostasna horizontal
    angulo1=(hcabo-1)/(distancia + r); % cateto formado 5,5 m do protótipo com a linha
```

```

theta1 = atan(angulo1);
R2 = (distancia+r)/cos(theta1);
R1= sqrt( (distancia)^2 + (hcabo-1)^2);
R3= sqrt( (distancia-1)^2 + (hcabo-1)^2);
Inom = 209;
theta=theta1;
case 230000
hcabo=7.33;
r = 2.52; .....% distância entre fases dispostas na horizontal
angulo1=(hcabo-1)/(distancia + r);
theta1 = atan(angulo1);
R2 = (distancia+r)/cos(theta1);
R1= sqrt( (distancia)^2 + (hcabo-1)^2);
R3= sqrt( (distancia-1)^2 + (hcabo-1)^2);
Inom = 1299;% VALOR FORNECIDO PELA LT UHE: CHAPECÓ - XANXERÉ
theta=theta1;
case 345000
hcabo=7.99;
r = 3.67; % distância entre fases dispostas na horizontal
angulo1=(hcabo-1)/(distancia + r);
theta1 = atan(angulo1);
R2 = (distancia+r)/cos(theta1);
R1= sqrt( (distancia)^2 + (hcabo-1)^2);
R3= sqrt( (distancia-1)^2 + (hcabo-1)^2);
Inom = 690;
theta=theta1;
case 440000
hcabo=8.54;
r = 4.62;
angulo1=(hcabo-1)/(distancia + r);
theta1 = atan(angulo1);
R2 = (distancia+r)/cos(theta1);
R1= sqrt( (distancia)^2 + (hcabo-1)^2);
R3= sqrt( (distancia-1)^2 + (hcabo-1)^2);
Inom = 900; %conferir este valor
theta=theta1;
case 500000
hcabo=8.89;
r = 5.22;
angulo1=(hcabo-1)/(distancia + r);
theta1 = atan(angulo1);
R2 = (distancia+r)/cos(theta1);
R1= sqrt( (distancia)^2 + (hcabo-1)^2);
R3= sqrt( (distancia-1)^2 + (hcabo-1)^2);
Inom = 1241;
theta=theta1;
case 750000
hcabo=10.33;
r = 7.72;
angulo1=(hcabo-1)/(distancia + r);

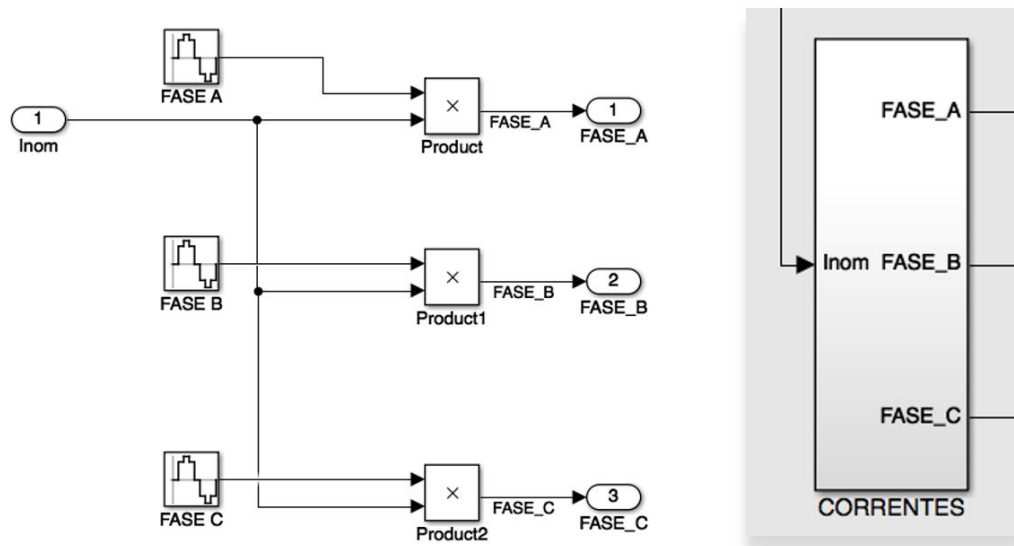
```

```

theta1 = atan(angulo1);
R2 = (distancia+r)/cos(theta1);
R1= sqrt( (distancia)^2 + (hcabo-1)^2 );
R3= sqrt( (distancia-1)^2 + (hcabo-1)^2 );
Inom = 1670;
theta=theta1;
otherwise
disp('ingressou valor não cadastrado ou errado... ')
end

```

Figura B.1 – Bloco de cálculo das correntes



Fonte: Autor.

CÓDIGO DO BLOCO : ÂNGULOS GERADOS PARÂMETROS DE POSIÇÃO

ÂNGULO FUNÇÃO DE R1

```

function phi1 = PHI1(R2,theta, r)
%#codegen
numerador=R2*cos(theta)-r/2;
denominador=R2*sin(theta)-r*sin(pi/3);
tangente=numerador/denominador;
phi1 = atan(tangente);
end

```

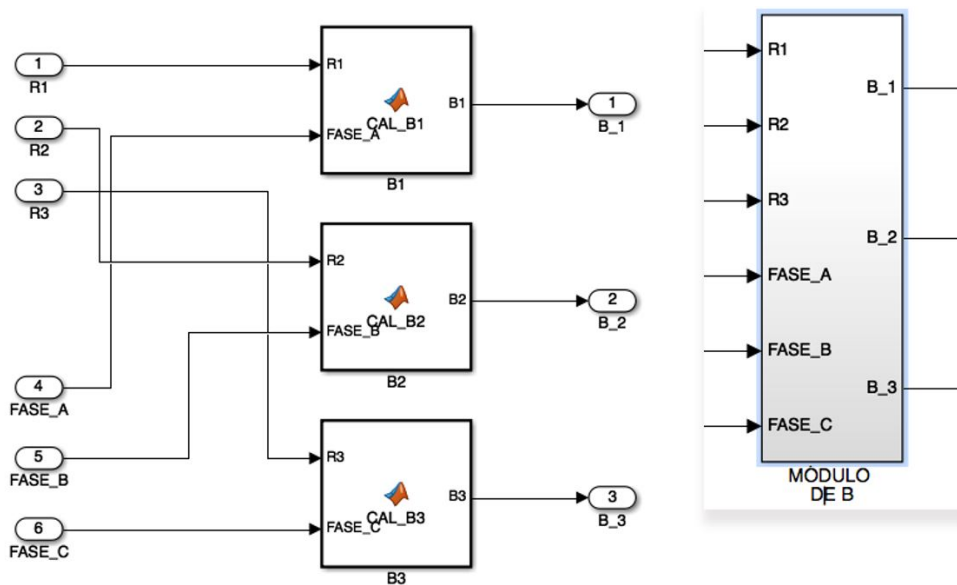
ÂNGULO FUNÇÃO DE R2

```
function phi2 = PHI2(theta)
%#codegen
phi2=pi/2-theta;
end
```

ÂNGULO FUNÇÃO DE R3

```
function phi3 = PHI3(R2,theta, r)
%#codegen
numerador=R2*cos(theta)-r;
denominador=R2*sin(theta);
tangente=numerador/denominador;
phi3 = atan(tangente);
end
```

Figura B.2 – Bloco de cálculo do módulo do campo



Fonte: Autor.

CÓDIGO DOS BLOCOS B1, B2 e B3

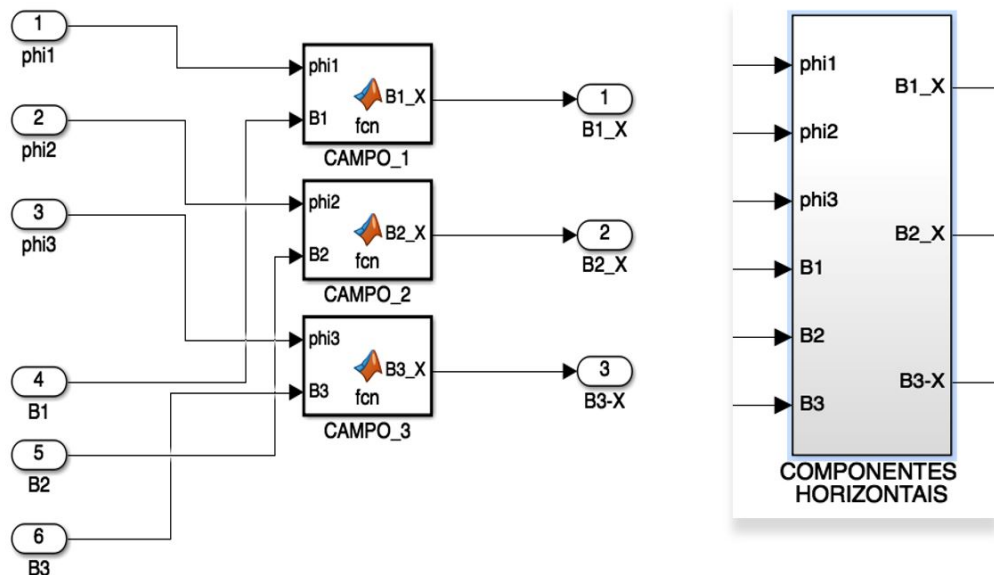
```
function B1 = CAL_B1(R1, FASE_A)
u0=4*pi*10^(-7);
ur=0.999991;
numerador=u0*ur*FASE_A;
denominador=2*pi*R1;
B1 = numerador/denominador;
end
function B2 = CAL_B2(R2, FASE_B)
```

```

u0=4*pi*10^(-7);
ur= 0.999991;
numerador=u0*ur*FASE_B;
denominador=2*pi*R2;
B2 = numerador/denominador;
end
function B3 = CAL_B3(R3, FASE_3)
u0=4*pi*10^(-7);
ur= 0.999991;
numerador=u0*ur*FASE_C;
denominador=2*pi*R3;
B3 = numerador/denominador;
end

```

Figura B.3 – Bloco de cálculo das componentes horizontais



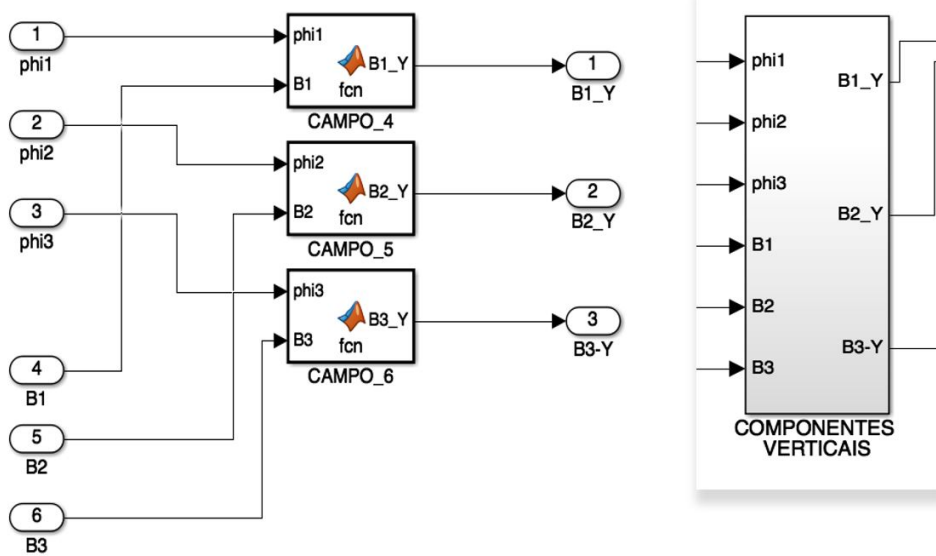
Fonte: Autor

```

function B1_X = fcn(phi1,B1)
B1_X= -B1*cos(phi1);
end
function B2_X = fcn(phi2,B2)
B2_X= -B2*cos(phi2) ;
end
function B3_X = fcn(phi3,B3)
B3_X= -B3*cos(phi3) ;
end

```

Figura B.4 – Bloco de cálculo das componentes verticais

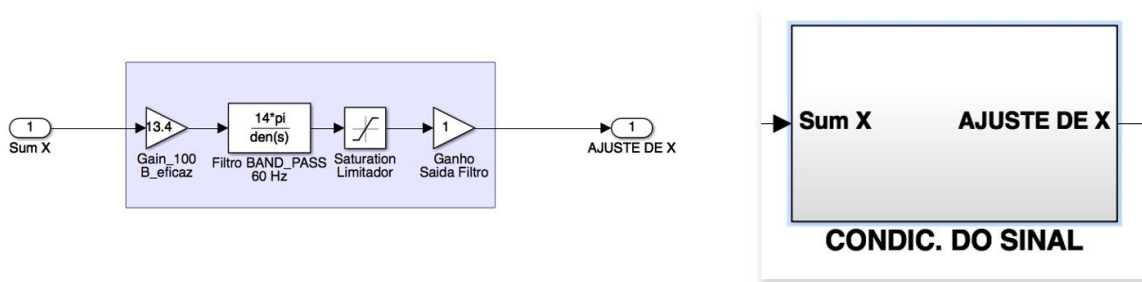


Fonte: Autor.

CÓDIGO CÁLCULO DO CAMPO

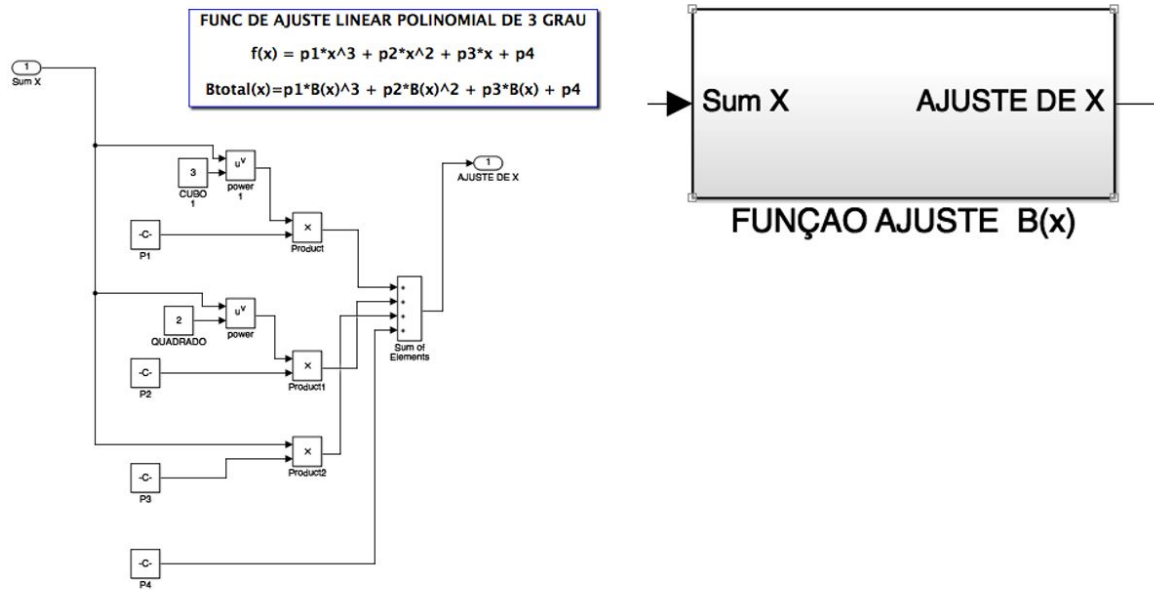
```
function B1_Y = fcn(phi1,B1)
B1_Y= -B1*cos(phi1-pi/2); %
end
function B2_Y = fcn(phi2,B2)
B2_Y= -B2*cos(phi2-pi/2);
end
function B3_Y = fcn(phi3,B3)
B3_Y= -B3*cos(phi3-pi/2);
end
```

Figura B.5 – Bloco de condicionamento do sinal



Fonte: Autor.

Figura B.6 – Bloco de ajuste do sinal por aproximação



Fonte: Autor.