



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de São João del-Rei

ACOPLAMENTO CIRCUITO-CAMPO EM SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE GALERKIN SEM ELEMENTOS - EFGM

GLEYDE SIMONE DE CAIRES MONTEIRO

ORIENTADOR: EDUARDO HENRIQUE DA ROCHA COPPOLI
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CEFET-MG

BELO HORIZONTE
NOVEMBRO DE 2020

GLEYDE SIMONE DE CAIRES MONTEIRO

**ACOPLAMENTO CIRCUITO-CAMPO EM SISTEMAS
ELÉTRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE GALERKIN SEM
ELEMENTOS - EFGM**

M775a Monteiro, Gleyde Simone de Caires
Acoplamento circuito-campo em sistemas elétricos utilizando o método de Galerkin sem elementos - EFGM / Gleyde Simone de Caires Monteiro. – 2020.
xviii, 99 f.: il., gráfs, tabs.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.
Orientador: Eduardo Henrique da Rocha Coppoli.
Banca examinadora: Úrsula do Carmo Resende, Alfred Gimpel Moreira Pinto, Raphael Paulo Braga Poubel.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Linhas elétricas – Modelos matemáticos – Teses. 2. Energia elétrica – Transmissão – Teses. 3. Métodos Galerkin – Teses. 4. Acoplamentos magnéticos – Teses. I. Coppoli, Eduardo Henrique da Rocha. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Universidade Federal de São João del-Rei. IV. Título.

CDD 621.319

GLEYDE SIMONE DE CAIRES MONTEIRO

**ACOPLAMENTO CIRCUITO-CAMPO EM SISTEMAS
ELÉTRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE GALERKIN SEM
ELEMENTOS - EFGM**

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - ASSOCIAÇÃO AMPLA ENTRE UFSJ E CEFET-MG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Belo Horizonte, 30 de Novembro de 2020

Eduardo Henrique da Rocha Coppoli
Orientador

Profa. Úrsula do Carmo Resende
Banca examinadora

Prof. Alfred Gimpel Moreira Pinto
Banca examinadora

Prof. Raphael Paulo Braga Poubel
Banca examinadora

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
BELO HORIZONTE
NOVEMBRO DE 2020

Dedico este trabalho a meu pai José Gualberto e à memória da minha mãe Deusa, que sempre me incentivaram e às minhas filhas Talita e Alice motivo pelo qual persisti, mesmo com grandes dificuldades para realização deste projeto.

Agradecimentos

Na realização da presente dissertação, contei com o apoio direto ou indireto de inúmeras pessoas, sendo com conselhos, ajuda técnica ou incentivos às quais estou profundamente grata.

Não poderia deixar de agradecer à Deus, que mesmo em momentos de grandes dificuldades, não me faltou.

Ao meu orientador o Doutor Professor Eduardo Henrique Coppoli, pela orientação, paciência, disponibilidade e igualmente pelo apoio e participação na elaboração deste trabalho.

A todos os amigos e colegas que de alguma forma, contribuíram ou auxiliaram na elaboração do presente estudo, pela paciência, atenção e força que prestaram em momentos menos fáceis. Desde já os meus sinceros agradecimentos.

Ao Gustavo Ribeiro pelo suporte referente aos assuntos técnicos do trabalho, ao professor Túlio Carvalho pelo suporte referente à ferramenta Matlab, à colega do mestrado Rakelane, todos contribuíram com apoio emocional e incentivo, sem os quais seria ainda mais árdua esta caminhada.

À toda minha família pelo incentivo, torcida e orações.

Ao meu esposo Alisson, mesmo que em certos momentos ausente por motivos particulares, me incentivou a continuar e concluir o trabalho.

À memória da minha sogra Angela, que nos deixou durante o período do trabalho.

Às minhas filhas Talita e Alice, razão do meu viver.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização do projeto.

Meu muito obrigada a todos!

“O SENHOR é meu pastor, nada me faltará. Deitar-me faz em verdes pastos, guia-me mansamente a águas tranquilas. Refrigera a minha alma, guia-me pelas veredas da justiça, por amor do seu nome. Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da morte, não temeria mal algum, porque Tú estás comigo, a tua vara e o teu cajado me consolam. Preparas uma mesa perante a mim na presença dos meus inimigos, unges a minha cabeça com óleo, o meu cálice transborda. Certamente que a bondade e a misericórdia divina me seguirão todos os dias da minha vida, e habitarei na casa do Senhor por longos dias.” (Salmo 23)

Resumo

A utilização de métodos numéricos para estudo e análise de sistemas de transmissão de energia mais complexos, torna-se cada vez mais efetivo, obtendo-se resultados mais próximos às condições físicas reais, devido ao desenvolvimento tecnológico. Neste contexto, este trabalho visa apresentar uma modelagem numérica e computacional baseada no Método de Galerkin Sem Elementos (EFGM) aplicada ao cômputo de campos magnéticos, bem como das tensões e correntes induzidas nas proximidades de circuitos elétricos e de Linhas de Transmissão de alta tensão (LTs). A principal característica deste método, como bem diz seu nome, é a não necessidade de uma malha de elementos, como acontece no Método de Elementos Finitos, o que o permite trabalhar com geometrias variadas com certa facilidade, uma vez que o deslocamento dos nós do método para regiões de interesse é realizado com grande facilidade. No EFGM há apenas uma distribuição de nós dentro da região do domínio do problema. Este método é normalmente utilizado para solução de equações diferenciais parciais, sendo que seu uso está crescendo acentuadamente para cálculos de campos eletromagnéticos e para o desenvolvimento de equipamentos elétricos. No trabalho atual foi utilizado o domínio do tempo (TD) que permite alguns benefícios para problemas eletromagnéticos, como por exemplo analisar o efeito sobre o campo devido a uma excitação arbitrária. O método (EFGM) tem apresentado boa convergência, e em alguns casos melhor que métodos consolidados como o Método de Elementos Finitos (FEM).

Palavras-chave: Métodos sem malha, Método de Galerkin sem Elementos, Linhas de Transmissão e acoplamento Circuito-campo.

Abstract

The use of numerical methods for the study and analysis of systems more complex energy transmission systems becoming more effective, obtaining results closer to those real conditions, due the technological development of computational systems. This research presents a numerical and computational modeling based on the Element-Free Galerkin Method (EFGM) evaluates and analyzes the magnetic fields , as well as the voltages and currents induced in the vicinity of electrical circuits and High Voltage Transmission Lines (TLs). The main characteristic of these methods is that they do not require a mesh , as it happens in the Finite Element Method, and is easier to work with different geometries, since the displacement of the nodes of the method for regions of interest is carried out with ease. There is only one set of nodes distributed in a region known as the problem domain. This method, is often used for solving partial differential equations. The time domain (TD) was used, which offers several benefits in electromagnetic problems, such as the transient field effect of an arbitrary time signal excitation, being that method EFGM is increasingly being used for eletromagnetic field computations and for modeling eletric devices. It has been shown that this method has a good convergence, sometimes better than that of the Finite Element Method (FEM).

Keywords: Element-Free. Transmission Lines. Magnetic Couplings.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Potencial Hidrelétrico Brasileiro por Bacias (PORTELA et al., 2007)	1
Figura 1.2 – O Sistema Elétrico Brasileiro (THÉRY; MELLO-THÉRY, 2016)	2
Figura 1.3 – Representação esquemática do SEP (SANTOS, 2017)	3
Figura 1.4 – Mapa Sistema de Transmissão do Brasil em 2017 (ONS, 2017).	4
Figura 2.1 – Discretização sem Malha em um domínio 2D (LIU, 2003)	14
Figura 2.2 – Domínios de influência (RIBEIRO, 2017)	15
Figura 2.3 – Domínios de influência retangulares. (COPPOLI, 2010)	15
Figura 2.4 – O princípio do Interpolating Moving Least Squares (MARINHO, 2012)	18
Figura 2.5 – Dilatação da função peso (COPPOLI, 2010)	19
Figura 2.6 – Função Peso IMLS e MLS (RIBEIRO, 2017)	20
Figura 2.7 – Representação dos pontos de integração aplicados no processo de integração numérica (RIBEIRO, 2017)	22
Figura 3.1 – Componentes de Linha de Transmissão (FARAH, 2014)	25
Figura 3.2 – Domínio Genérico com Presença de Densidades de Corrente Trans- versais (FARAH, 2014).	25
Figura 3.3 – Acoplamento Indutivo (AL-GAHTANI, 2009).	26
Figura 3.4 – Domínio bidimensional com suas fronteiras, materiais, fonte de cor- rente e corrente induzida. (COPPOLI, 2010)	29
Figura 3.5 – Linha de Transmissão	36
Figura 3.6 – Objeto metálico - condutor (COPPOLI, 2010).	37
Figura 3.7 – Condutor sólido em série (BASTOS; SADOWSKI, 2003).	41
Figura 4.1 – Condutor simples e espira - planta	44
Figura 4.2 – Linha de Transmissão e objeto metálico/Cerca	45
Figura 4.3 – Truncamento na Fronteira (FARAH, 2014) (RIBEIRO, 2017)	46
Figura 4.4 – Fases ABC de um sistema trifásico simétrico (RIBEIRO, 2017)	47
Figura 4.5 – Feixes de condutores (STEVENSON, 1986)	48
Figura 4.6 – Feixe de condutores igual ou superior a cinco (COSTA, 2009)	49
Figura 4.7 – Condutor simples e espira - planta	49
Figura 4.8 – Condutor simples e espira - corte	50
Figura 4.9 – Intensidade do Campo Magnético no centro da espira (A/m)	52
Figura 4.10–Densidade de Fluxo Magnético	53
Figura 4.11–Força Eletromotriz induzida na espira (Volts)	53
Figura 4.12–Condutor sólido em série (BASTOS; SADOWSKI, 2003).	54
Figura 4.13–Condutor/fase e condutor sólido - Planta	54
Figura 4.14–Condutor/fase e condutor sólido - Vista	54
Figura 4.15–Intensidade do Campo Magnético (A/m)	55

Figura 4.16–Densidade de Fluxo Magnético	55
Figura 4.17–Força Eletromotriz induzida (Volts)	56
Figura 4.18–Corrente Induzida (A)	56
Figura 4.19–Tensão Induzida (V)	57
Figura 4.20–Linha de Transmissão e objeto metálico/Cerca	58
Figura 4.21–Posição Condutores da Linha de Trasmissão Trifásica com Cerca . . .	59
Figura 4.22–Intensidade do Campo Magnético (A/m)	59
Figura 4.23–Densidade de Fluxo Magnético	60
Figura 4.24–Força Eletromotriz Induzida (V)	60
Figura 4.25–Corrente Induzida (A)	61
Figura 4.26–Tensão Induzida (V)	61
Figura 4.27–Módulo da Intensidade do Campo Magnético no Centro da Cerca (A/m)	62
Figura 4.28–Força Eletromotriz Induzida (V)	63
Figura 4.29–Corrente Induzida (A)	63
Figura 4.30–tensão Induzida (V)	63
Figura 4.31–Posição Condutores da Linha de Trasmissão Trifásica e objeto metálico	64
Figura 4.32–Posição Condutores da Linha de Trasmissão Trifásica	65
Figura 4.33–Intensidade do Campo Magnético (A/m)	66
Figura 4.34–Densidade de Fluxo Magnético	66

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Características do Circuito Base	49
Tabela 4.2 – Características da Espira	50
Tabela 4.3 – Análise de erro da intensidade do campo magnético	51
Tabela 4.4 – Análise da densidade do fluxo magnético	52
Tabela 4.5 – Análise de erro da Força Eletromotriz	52
Tabela 4.6 – Análise de erro da intensidade do campo magnético	54
Tabela 4.7 – Análise da densidade do fluxo magnético	55
Tabela 4.8 – Análise de erro da Força Eletromotriz	56
Tabela 4.9 – Características da LT Trifásica	58
Tabela 4.10–Análise de erro da intensidade do Campo magnético	59
Tabela 4.11–Análise da Densidade do fluxo magnético	60
Tabela 4.12–Análise de erro da Força Eletromotriz	61
Tabela 4.13–Intensidade Campo magnético	62
Tabela 4.14–Força Eletromotriz Induzida	62
Tabela 4.15–Corrente Induzida na Cerca	62
Tabela 4.16–Características da LT Trifásica do artigo	64
Tabela 4.17–Análise de erro da Intensidade do Campo magnético	65
Tabela 4.18–Análise do fluxo magnético	65
Tabela B.1 – Níveis de Referência para campos elétricos e magnéticos variantes no tempo na frequência de 60 Hz. (SILVA, 2010)	83
Tabela D.1–Basic restrictions for human exposure to time-varying electric and magnetic fields.	96
Tabela D.2–Reference levels for occupational exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).	98
Tabela D.3–Reference levels for general public exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).	98
Tabela D.4–Reference levels for time-varying contact currents from conductive objects.	99

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transient Program
BEM	Boundary Element Method
CEP	Condutor Elétrico Perfeito
DEM	Diffuse Element Method – Método de Elemento Difuso
EDP	Equações Diferenciais Parciais
EFG	Element Free Galerkin
EFGM	Element Free Galerkin Method – Método de Galerkin sem Elemento
FDM	Finite Difference Method – Método das Diferenças Finitas
FDTD	Finite Difference Time-Domain – Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
FEM	Finite Element Method – Método dos Elementos Finitos
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizantes
IEFGM	Interpolating Element Free Galerkin Method – Método dos Elementos Livres de Galerkin Interpolantes
IMLS	Interpolating Moving Least Squares – Mínimos Quadrados Móveis Interpolantes
LPIM	Local Point Interpolation Method – Método de Interpolação de Pontos Locais
LRPIM	Local Radial Point Interpolation Method – Método de Interpolação de Pontos Locais Radiais
LT	Linha de Transmissão
MEC	Método dos Elementos de Contorno

MLPG	Meshless Local Petrov-Galerkin – Método Local de Petrov-Galerkin Sem Malha
MLS	Moving Least Squares – Mínimos Quadrados Móveis
MLSRKPM	Moving Least Squares Reproducing Kernel Particle Method
MOM	Método dos Momentos
OMS	Organização Mundial de Saúde
PIM	Point Interpolation Method – Método de Interpolação de Pontos
RMG	Raio Médio Geométrico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SPH	Smooth Particle Hydrodynamics
TD	Time Domain - Domínio do tempo

Lista de Símbolos

Grandezas elétricas

B	Densidade de fluxo magnético [T]
<i>C</i>	Capacitância [F]
D	Densidade de fluxo elétrico [C/m^2]
E	Campo elétrico [V/m]
E_{cr}	Campo elétrico crítico [kV/cm]
E_{crM}	Campo elétrico máximo admissível [kV/cm]
E_s	Campo elétrico superficial [kV/cm]
ε	Permissividade elétrica [F/m]
ε_0	Permissividade elétrica do espaço livre [F/m]
ε_r	Permissividade elétrica relativa do ar [F/m]
<i>f</i>	Frequência [Hz]
<i>G</i>	Condutância [S]
H	Intensidade de campo magnético [A/m]
H^1	Espaço de Funções Cujas Derivadas Primeiras Possuem Quadrado Integrável.
\hat{H}^1	Espaço de Funções Aproximadas Cujas Derivadas Primeiras Possuem Quadrado Integrável, sendo que $\hat{H}^1 \subset H^1$.
ϕ	Força Eletromotriz [V]
∞	Infinito
<i>I</i>	Corrente elétrica [A]
J	Densidade de corrente [A/m^2]
<i>K</i>	Matriz de Rigidez
<i>L</i>	Indutância [H]

μ	Permeabilidade magnética [H/m]
μ_0	Permeabilidade magnética do espaço livre [H/m]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa do ar [H/m]
N	Matriz de Massa
n_f	Número de fases
\bar{p}	Profundidade complexa [m]
P_c	Potência natural [MW]
R	Resistência [Ω]
ρ_L	Densidade linear de carga [C/m]
ρ_s	Resistividade elétrica do solo [$\Omega \cdot m$]
s	Velocidade de fase [m/s]
σ	Condutividade elétrica [S/m]
Γ	Fronteira do Domínio do Problema
Γ_u	Fronteira de Diriclet
Γ_t	Fronteira de Neumann
t	Tempo [s]
V	Tensão [V]
∇	Operador Gradiente
v	Relutividade do material [$A \cdot m / \text{weber}$]
ω	Frequência angular [rad/s]
W	Função Peso ou Função Janela.
W_i	Função Peso Discreta.
Y	Admitância [S]
Z	Impedância [Ω]
Z_C	Impedância característica [Ω]
Ω	Domínio

\forall	Para todo
ϕ	função de forma

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Revisão Bibliográfica	6
1.2.1 Métodos utilizados para o Cálculo e Efeitos de Campos Eletromagnéticos	6
1.3 Relevância do trabalho	10
1.4 Objetivo e justificativa	11
1.5 Organização do Trabalho	12
2 – Métodos sem Malha	13
2.1 Introdução	13
2.2 Conceitos básicos	13
2.3 Método de Galerkin sem Elementos (EFGM)	15
2.3.1 Método dos Mínimos Quadrados Móveis (MLS)	16
2.3.2 Método dos Mínimos Quadrados Móveis Interpolantes (IMLS)	17
2.3.3 Suporte Compacto e a Função Peso	18
2.3.4 Integração Numérica	21
2.4 Escolha do Método sem Malha	22
3 – Modelagem Eletromagnética para Acoplamento Circuito Campo	24
3.1 Introdução	24
3.2 Linhas de Transmissão	24
3.3 Acoplamento Indutivo	25
3.4 Equações de Maxwell	27
3.5 Formulação Clássica para cálculo do Campo Magnético	27
3.5.1 Formulação para o Potencial Magnético Utilizando Discretização Temporal	29
3.5.2 Formulação Variacional	31
3.5.3 Discretização no Tempo	34
3.6 Modelagem para Indução	35
3.6.1 Região fora do objeto metálico	35
3.6.2 Região do objeto metálico	37
3.6.3 Equações finais circuito-campo	41
3.7 Considerações Finais	43
4 – Resultados	44

4.1	Parâmetros do Problema	45
4.1.1	Condições de Contorno	45
4.1.1.1	Tratamento do Domínio Aberto	45
4.1.1.2	Truncamento de Fronteira	46
4.1.2	Corrente Nominal	46
4.1.3	Raio Médio Geométrico - RMG	48
4.2	Características do Circuito Base	49
4.3	Validação da Metodologia e dos valores obtidos	50
4.3.1	Validação de resultados para o circuito base	51
4.3.1.1	Fio/condutor simples e uma espira	51
4.3.2	Indução de Correntes e Tensões	53
4.3.2.1	Fio/condutor simples e um condutor sólido com resis- tência e indutância	53
4.4	Acoplamento Circuito-Campo em Linhas de Transmissão	57
4.4.1	Validação do Cálculo das Grandezas Eletromagnéticas	57
4.4.1.1	Apresentação da Linha de transmissão e a cerca	57
4.4.1.2	Resultados para uma fase ligada	58
4.4.1.3	Resultados para 3 Fases da Linha de transmissão Ligadas	61
4.4.1.4	Linha de transmissão com resultados preliminares para campo magnético e densidade de fluxo magnético	64
4.4.2	Considerações Finais	66
5	– Conclusão	68
5.1	Principais contribuições	69
5.2	Sugestão para trabalhos futuros	69
5.3	Artigo em Eventos e Congressos	70
	Referências	71
	 Apêndices	 78
	APÊNDICE A – Formulações Analíticas dos Campos Eletromagnéticos	79
A.1	Equações de Maxwell	79
	APÊNDICE B – Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL	81
B.1	Resolução Normativa N° 398, de 23 DE Março de 2010	81
B.1.1	ANEXO DA RN 398 ANEEL	86
	APÊNDICE C – Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL	89

C.1	Resolução Normativa ANEEL N° 413, de 3 de Novembro de 2010	89
C.1.1	ANEXO DA RN 413 ANEEL	90
APÊNDICE D–ICNIRP - International Comission On Non-Ionizing Radia-		
	tion Protection	93
D.0.1	Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and mag- netic fields	93

1 | Introdução

1.1 Contexto

A produção e a circulação de energia elétrica articulam regiões produtoras com as regiões consumidoras (aquelas onde a concentração da população e da atividade econômica cria uma forte demanda). Com o desenvolvimento tecnológico, cada vez mais torna-se imprescindível o aumento por demanda de energia elétrica, bem como a melhoria do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, reduzindo-se perdas e impactos. Condição crítica em países de longa extensão territorial, como é o caso do Brasil, que dispõe de recursos não explorados, mas que ficam distantes dos grandes centros consumidores. Como mostrado na Figura 1.1, que apresenta o potencial hidrelétrico do Brasil disponível e utilizado.

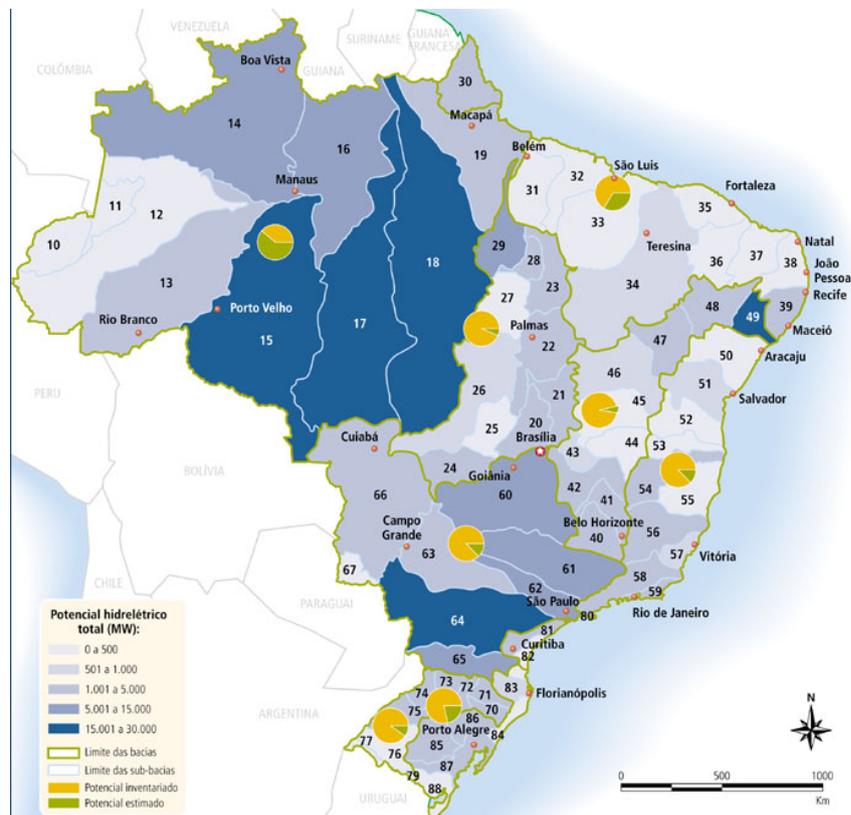


Figura 1.1 – Potencial Hidrelétrico Brasileiro por Bacias (PORTELA et al., 2007)

A matriz energética brasileira é essencialmente baseada na hidroeletricidade e o potencial hidrográfico ainda pouco explorado encontra-se na região norte do país, provocando o distanciamento entre as fontes de produção e de consumo. Conforme Figura 1.2, que mostra a inadequação destas duas geografias, obrigando a construção de linhas de transporte, as quais estão entre as mais longas e potentes no mundo (THÉRY; MELLO-THÉRY, 2016).

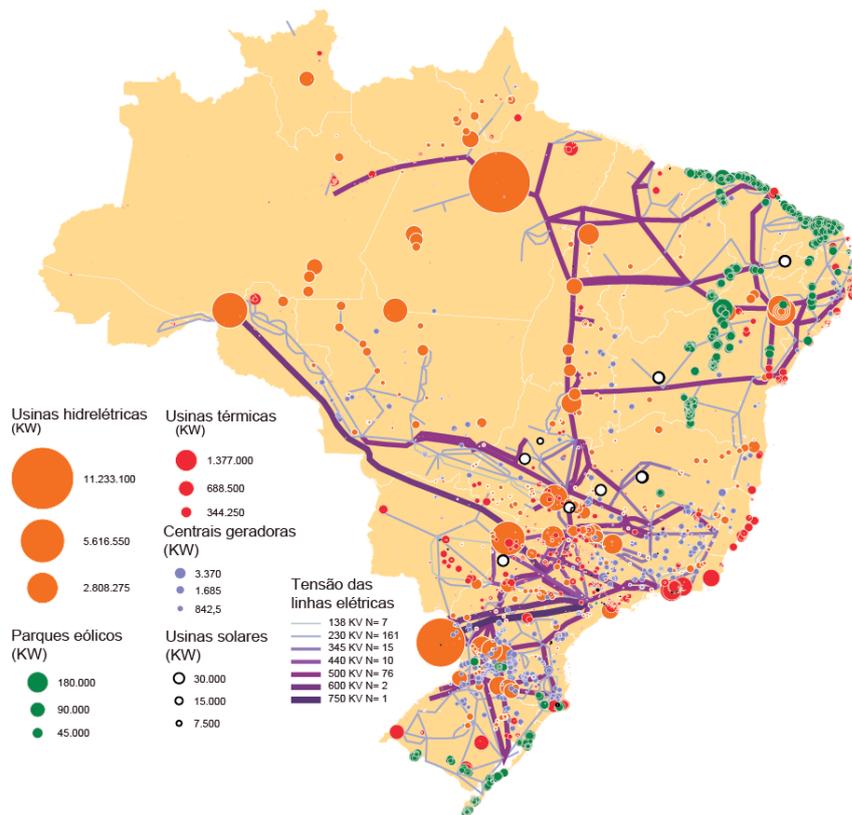


Figura 1.2 – O Sistema Elétrico Brasileiro (THÉRY; MELLO-THÉRY, 2016)

Diante do desafio do aumento da demanda de energia elétrica, visando também menores perdas e impactos econômicos, ambientais e sociais surge também a necessidade de uma normatização que regulamente os níveis de campos eletromagnéticos irradiados por equipamentos do sistema elétrico de potência e maior confiabilidade no fornecimento desta energia. As linhas de transmissão, bem como os geradores e os transformadores são partes indispensáveis para o sistema de Energia Elétrica, onde também ocorrem os acoplamentos magnéticos. (PEREIRA, 2009).

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são sistemas complexos que incluem um grande número de equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, que percorrem desde as usinas geradoras até os centros de carga, para usos residenciais, comerciais ou industriais, conforme ilustrado na Figura 1.3.

O desenvolvimento econômico de um país pode ser medido pelo consumo per capita de energia elétrica e no aumento deste consumo. Pois o aumento do gasto de



Figura 1.3 – Representação esquemática do SEP (SANTOS, 2017)

energia elétrica está diretamente ligado ao aumento da produção industrial e ao poder aquisitivo de sua população. (RIBEIRO, 2017). Devido a este fato, é requisitado aumentar constantemente a demanda disponível nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), pois um déficit energético representa um retrocesso ao desenvolvimento (FUCHS, 1977). No total, o potencial hidrelétrico e seu aproveitamento permitiram que o Brasil cobrisse amplamente suas necessidades de eletricidade e elevasse a sua capacidade instalada de 5.000 MW em 1960 para 11.000 MW em 1970 e 89.193 MW em 2014, e aumentasse o consumo de eletricidade per capita de 415 kW em 1970 para 2.370 kW em 2010 (2.750 no Sudeste)(THÉRY; MELLO-THÉRY, 2016). Dentre os motivos físicos, econômicos e ambientais existe a necessidade de aumento da potência a ser transmitida por linhas de transmissão (LTs), da melhor utilização dos recursos disponíveis, e conseqüentemente, a elevação de tensão e corrente, com aumento dos níveis de campo elétrico e magnético associados, o que pode ocasionar interferência eletromagnética em objetos próximos à linha de transmissão. O aumento dos níveis eletromagnéticos podem ser nocivos (CARTENSEN, 1995), (HAVAS, 2004), (WERTHEIMER; LEEPER, 1979), (NIEHS et al., 1999) e, por isso, questões de segurança devem ser seguidas, garantindo que pessoas não sejam expostas a campos eletromagnéticos superiores aos limites permitidos por normas (GUIMARÃES, 2005). Estas normas e diretrizes nacionais e internacionais sugerem limites para a exposição a campos elétricos e magnéticos determinando procedimentos para a correta medição (IEEE-STD.644-1994, 1994), (ICNIRP, 1998), (IEC.61786, 1998), (ANEEL.398, 2010),(ANEEL.413, 2010), (ICNIRP, 2010), (NBR25415, 2016).

Em março de 2010 a ANEEL publicou a resolução normativa nº 398 que regulamenta os procedimentos a serem seguidos pelas concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de energia elétrica quanto à medição e cálculo dos campos elétricos e magnéticos. A resolução 398 da ANEEL vem ao encontro das necessidades atuais, visto que linhas de transmissão de alta potência, que no passado situavam-se, em sua maioria, em zonas rurais, e que passam a fazer parte do cenário urbano, onde os efeitos dos campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão, subestações de energia e outros equipamentos elétricos, sobre a saúde humana, são questionados também pelo público em geral (SILVA, 2010).

Aliado ao aumento das cidades, áreas urbanas e a demanda de energia elétrica, vem a necessidade por mais máquinas ou equipamentos elétricos, transformadores e mais linhas de transmissão, e em contrapartida há a dificuldade em se obter novos corredores para a construção de novas linhas e fatores econômicos e ambientais, que impõe a necessidade de maximizar o aproveitamento das linhas existentes de modo a aumentar a sua capacidade de transmissão de energia (FARAH, 2014). A Figura 1.4 apresenta o mapa do sistema de transmissão de energia do Brasil no ano de 2017, mostra a complexidade e extensão do sistema de transmissão de energia elétrica no Brasil.

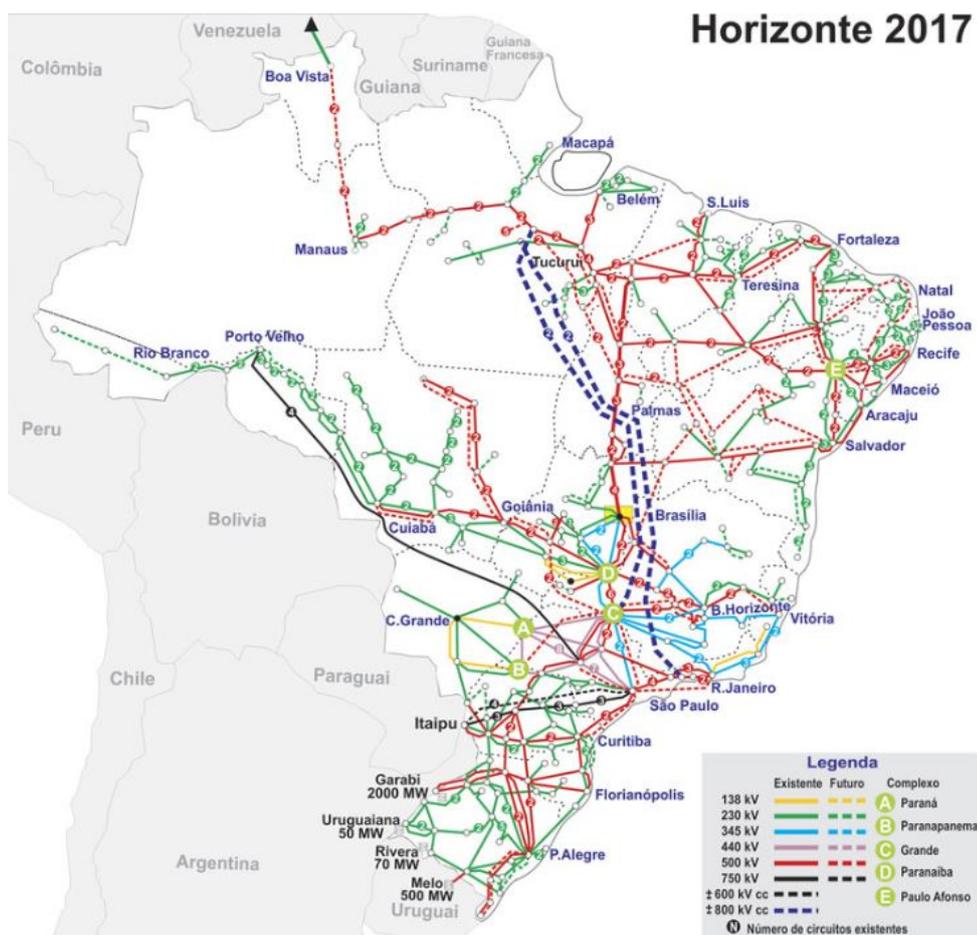


Figura 1.4 – Mapa Sistema de Transmissão do Brasil em 2017 (ONS, 2017).

As técnicas utilizadas para análise de solução de problemas de campos eletromagnéticos podem ser classificadas, de maneira geral, como técnicas experimentais, analíticas e numéricas. Os métodos experimentais necessitam da construção de protótipos que geralmente são caros, demorados, incertos e normalmente não permitem a variação de parâmetros, dificultando a compreensão física dos fenômenos envolvidos. Quanto aos métodos numéricos, muitos deles envolvem simplificações analíticas no ponto em que serão aplicados.

Destaca-se a seguir alguns métodos normalmente aplicados no cálculo de campos eletromagnéticos associados à linhas de transmissão, por exemplo (SILVA, 2010):

Métodos analíticos (solução exata): separação de variáveis, expansão em séries, soluções integrais (transformadas de Laplace e Fourier), polinômios de Legendre e funções de Bessel;

Métodos numéricos (solução aproximada): método das diferenças finitas (MDF) no domínio do tempo ou da frequência, método dos momentos (MoM), método dos elementos de contorno (MEC), método dos elementos finitos (FEM) e método de Galerkin sem elementos (EFGM).

De maneira geral, a escolha do método de análise a ser aplicado para solução de um problema em eletromagnetismo deve levar em conta alguns aspectos da solução desejada (como por exemplo: quantitativo ou qualitativo), da dinâmica do problema analisado (estático, quase-estático, baixa ou alta frequência), das dimensões do domínio (uma, duas ou três dimensões), ou domínio de solução (finito ou infinito), da variação com o tempo ou com a frequência, das características dos materiais (lineares ou não lineares, com ou sem perdas), e da sua aplicação (estudo de máquinas elétricas ou linhas de transmissão) (SILVA, 2010). Considere, por exemplo, problemas onde as fronteiras são alteradas com o tempo, como uma máquina elétrica em movimento, ou quando trincas em uma superfície aumentam continuamente, quando é aplicado um método como o de elementos finitos, acontece uma deformação acentuada nos elementos gerando perda de precisão. De forma objetiva deve-se levar em consideração questões relacionadas ao custo computacional, estabilidade, precisão e objetivo do cálculo (COPPOLI, 2010).

Os passos para a construção do método de aproximação utilizado neste trabalho, o EFGM, que não necessita de geração de malha. iniciou-se com a definição da geometria do problema. Definimos a linha de transmissão a ser analisada, calculamos onde colocaríamos a fronteira ou o domínio do problema e após definida a geometria foi feita a distribuição de nós por todo o domínio de interesse. A cada nó é associado um subdomínio fechado, chamado de domínio de influência do nó. Deve haver sobreposição dos subdomínios, para que todo o domínio seja coberto e não deve haver conexão entre os nós. E isto já pode tornar o custo computacional menor, devido a não obrigatoriedade da geração da malha. As funções do problema são aproximadas, então, por um processo discreto e são usadas para resolver problemas de valor de contorno empregando o método de Galerkin (VIANA, 1998).

Diante da importância de se obter um sistema de transmissão de energia confiável e seguro, este trabalho apresenta uma metodologia recente e ainda pouco usada para cálculo do campo magnético, bem como as induções geradas por linhas aéreas de transmissão de energia. O cálculo do campo magnético é um dos passos para a análise das perdas nestas linhas para diferentes configurações e, conseqüentemente, da análise de possíveis soluções para o seu melhor aproveitamento. Outro fato que leva à necessidade do cálculo de campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão é

a interferência em elementos externos como linhas férreas, oleodutos, gasodutos, dentre outros (SILVA, 2010).

1.2 Revisão Bibliográfica

O avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas teve impacto relevante na solução de problemas numéricos. Contudo, ainda não se pode tratar muitos problemas complexos com métodos já consolidados, pois são introduzidas várias dificuldades, como modificação de geometrias, geração de malhas, discretização de nós, que podem piorar a precisão, além de aumentar o custo computacional. Novas técnicas permitirão melhor avaliação destes campos em relação à exposição de seres vivos e objetos evitando danos e prejuízos (OLSEN; WONG, 1992).

Foi apresentado a seguir um estudo relacionado a alguns dos métodos numéricos mais utilizados na atualidade e suas aplicações no cálculo de campos eletromagnéticos. Especial atenção será dada ao método de Galerkin sem Elementos (EFGM).

1.2.1 Métodos utilizados para o Cálculo e Efeitos de Campos Eletromagnéticos

A técnica sem malha, tem um histórico considerável, sendo que encontra-se publicações com mais de 80 anos, são exemplos o Método de Colocação de (SLATER, 1934), (FRASER et al., 1934), (LANCZOS, 1938), com um gap temos então o Método do Vórtice (*Vortex Method*) (CHORIN, 1973), (BERNARD, 1995), o Método das Diferenças Finitas (*Finite Difference Method - FDM*) utilizando grades arbitrárias ou o Método das Diferenças Finitas Geral (*Geral Finite Difference Method - GFDM*), (GIRAULT, 1974); (PAVLIN; PERRONE, 1975); (SNELL; VESEY, 1981); (LISZKA; ORKISZ, 1977); (KROK; ORKISZ, 1989). Em 1977 foi apresentado o método de Hidrodinâmica de Partículas Suavizado (*Smoothed Particle Hydrodynamics - SPH*), utilizado para modelagem de fenômenos astrofísicos como estrelas e nuvens de poeira sem fazer o uso de fronteiras. (GINGOLD; MONAGHAN, 1977); (MONAGHAN; LATTANZIO, 1985); (MONAGHAN, 1992). Entretanto, a importância da técnica sem malha é refletida pela evolução tecnológica após 1990 com métodos que foram propostos utilizando a forma fraca: Método de Elemento Difuso (*Diffuse Element Method - DEM*) (NAYROLES et al., 1992), Método de Galerkin Sem Elementos (*Element-Free Galerkin Method - EFGM*) (BELYTSCHKO et al., 1994); (BELYTSCHKO T.; KRYSL, 1996)(ATLURI; ZHU, 1998), Método de Partículas com Núcleo Reproduzido usando Múltipla Escala e Wavelet (*Wavelet and Multiple Scale Reproducing Kernel Method*) (LIU et al., 1995), Método de Partícula com Núcleo Reproduzido (*Reproducing Kernel Particle Method - RKPM*) (LIU et al., 1995), Método de Ponto Finito

(*Finite Point Method* – FPM) (OÑATE et al., 1995) o Método de Partição da Unidade (*The Partition of Unity Method* - PUM) (BABUSKA; MELENK, 1996); Método do Nó de Fronteira (*Boundary Node Method* – BNM), (MUKHERJEE, 1997), Método *Meshless Local Petrov-Galerkin* (MLPG), o (*Point Interpolation Method* - PIM) (LIU; GU, 2001); (WANG; LIU, 2000), o *Local Point Interpolation Method* (LPIM), e o Método sem Malha Fraca-Forte (*Meshfree Weak-Strong* - MWS), (LIU; GU, 2002), dentre outros (VIANA, 1998), (RIBEIRO, 2017).

(NAYROLES et al., 1992) implementou o método dos elementos difusos em formulação de Galerkin, substituindo a formulação do FEM por aproximações difusas das funções de forma nos pontos de integração. Os elementos são usados para integração numérica.

(BELYTSCHKO; GU, 1993) (BELYTSCHKO et al., 1994) em 1993 publicaram um artigo sobre a nova implementação do Método de Galerkin sem elementos, que é um método utilizando equações diferenciais parciais (EDP), que necessita somente dos dados dos nós sem a necessidade de conexão entre eles. Podendo ser utilizado em problemas com formatos diversos. Inicialmente utilizaram o método de mínimos quadrados móveis (MLS) para evitar a inversão da matriz e multiplicadores de Lagrange para impor as condições de contorno, o que aumentou o custo computacional para a solução do problema. No artigo concluem que o método de Galerkin sem elementos é mais preciso que o FEM em alguns casos. Em 1994 apresentaram mais resultados com a técnica de Galerkin sem elementos, onde comprovam o melhor desempenho do EFGM em relação ao FEM.

(FELLOW et al., 1995) publicaram um estudo sobre os efeitos causados pela exposição aos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão. Levando em conta realização de atividades secundárias próximo às linhas de transmissão. Os campos magnéticos são mais complexos de serem medidos pois variam com o tempo e espaço. Vários estudos sobre os efeitos de campos magnéticos gerados por linhas de transmissão são feitos, mas nenhum comprovou a existência de quaisquer consequências para a saúde dos seres humanos, animais e plantas e as dúvidas e pesquisas continuam.

(CORDES; MORAN, 1996) publicaram um artigo sobre o Método de Galerkin Sem Elementos no tratamento de descontinuidade de materiais mecânicos. Com muitas vantagens para problemas estáticos e dinâmicos. Foi comprovado que para problemas de propagação de fissura, onde foram adicionados ou movidos nós, o Método de Galerkin Sem Elementos apresentou melhor convergência que o Método de Elementos Finitos.

(DOLBOW; BELYTSCHKO, 1998) descreveram detalhadamente o método de Galerkin Sem Elementos, o uso do MLS, bem como a importância da função de peso e desenvolvem implementação numérica para problemas lineares unidimensionais de

elasticidade e apresentam um problema básico de duas dimensões e seus resultados.

(ATLURI; ZHU, 1998) publicaram um artigo sobre um novo método numérico baseado na configuração sem elementos, *Meshless Local Petrov-Galerkin* (MLPG). Foi desenvolvida uma forma fraca simétrica, onde são impostas condições de contorno. O método apresentado é mais flexível e fácil para lidar com problemas não-lineares do que os métodos convencionais como o método de elementos finitos (FEM), EFG e BEM.

(VIANA, 1998) descreveu conceitos fundamentais, desenvolvimento e implementação dos métodos sem malhas dos Mínimos Quadrados Móveis (MLS) e Mínimos Quadrados Móveis com Núcleo Reproduzido (MLSRKPM) ao método de Galerkin para análise de problemas eletromagnéticos de contorno. No trabalho conclui que as funções de forma geradas a partir do MLS quando usadas no método de Galerkin resultam no Método de Galerkin sem malha (EFGM). Verifica também que a complexidade dos multiplicadores de Lagrange pode ser resolvida pelo Método de Eliminação de Gauss, e a relevância da extensão do domínio de influência dos nós para a convergência do método.

(HAVAS, 2004) seus estudos mostram a polarização de cientistas quanto aos efeitos nocivos à saúde causados por campos magnéticos em baixa frequência. Até aproximadamente 1960 as frequências abaixo da banda de micro-ondas eram consideradas inofensivas, mas a partir de 1970 começaram estudos na União Soviética, após as primeiras subestações de 500 kV se tornarem operacionais e aparecerem diversos relatos de trabalhadores com problemas de saúde. Em 1979, (WERTHEIMER; LEEPER, 1979), foram os primeiros a relatar danos associados à exposição residencial próximas à linha de transmissão, em Denver, nos Estados Unidos, teve um aumento da incidência de leucemia infantil, linfoma e tumores do sistema nervoso. Muitos estudos têm sido feitos, uns que não comprovam esses resultados e outros sim.

(GUIMARÃES, 2005) sua dissertação fez parte de um projeto realizado por convênio entre CEMIG e UFMG, aprovado pela ANEEL para desenvolver uma metodologia para determinação das intensidades dos campos elétricos e magnéticos nas proximidades de linhas de transmissão. Inicialmente, o cálculo de campos elétrico e magnético gerados pela distribuição de cargas e correntes em LTs foi feito através de formulações analíticas, partindo das equações de Maxwell, fazendo uso de considerações quase-estática e do desacoplamento dos campos elétricos e magnéticos existentes.

(ISMAIL, 2007) publica um artigo sobre os efeitos dos campos elétricos gerados por linhas de transmissão sobre tubulações de gás. Ele faz estudos sobre possíveis perigos para seres humanos e animais.

(CASACA, 2007) estuda os efeitos dos campos elétrico e magnético na saúde, e estuda mais profundamente o campo magnético devido este adentrar mais profunda-

mente no corpo humano.

(PERRO, 2007) apresenta uma visão geral dos campos eletromagnéticos em linhas de transmissão e seus efeitos. Para o campo magnético e as indutâncias relacionadas as impedâncias da linha de transmissão são utilizadas as equações de Carson. Mostra também simulações de campos elétricos em linhas de transmissão e sua influência em oleodutos. Apresentando as diferenças obtidas alterando o tipo de condutores, ou altura dos mesmos.

(BARAÚNA, 2007) faz uma análise da influência de linhas de transmissão aéreas em regime permanente em tubulações metálicas enterradas.

(BECKER, 2008) Estuda técnicas para redução de campos gerados por linhas de transmissão de potência.

(AL-GAHTANI, 2009) faz uma pesquisa detalhada sobre os efeitos dos campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão e sua indução sobre gasodutos, estruturas metálicas e linhas de telecomunicações. Apresenta a cronologia de desenvolvimentos nos estudos realizados sobre o assunto desde os anos 70 e seus pontos mais relevantes tais como cálculo de interferências geradas, tensões induzidas, máximas tensões de passo e toque aceitáveis e formas de reduzi-las ou controlá-las.

(COPPOLI, 2010) em sua pesquisa modelou uma estrutura magnética em movimento, motor elétrico, para cálculo de campos magnéticos e correntes induzidas que originam o fluxo magnético responsável pelo torque da máquina, baseado no método sem malha denominado *Element-Free Galerkin Method*.

(FARAH, 2014) apresenta modelagem no Método dos Elementos Finitos aplicado ao computo do campo eletromagnético quase-estático de linhas de transmissão aéreas. O cômputo de campos elétricos e magnéticos nem sempre é trivial, o emprego de métodos analíticos fica limitado em sua geometria, diante disso a necessidade de modelos numéricos robustos, propiciando uma investigação mais profunda e menos conservadoras. O FEM está sendo aplicado em diversos problemas de engenharia devido a facilidade em lidar com estruturas de grande complexidade geométrica. O uso de FEM no cálculo dos campos elétricos e magnéticos ao entorno de linhas de transmissão de alta tensão em CA pode ser encontrado em (HAMEYER et al., 1995), (PASARE, 2008) e (RAZAVIPOUR et al., 2012), (HAMEYER et al., 1996) e (SILVA, 2010). O trabalho apresenta muitos resultados para cálculo de campos elétricos, acoplamento capacitivo de linhas de transmissão, devido a necessidade de modelo de cálculo mais robusto para propiciar melhores resultados para análise de campos elétricos e magnéticos.

(SOARES; AFONSO, 2014) em seu trabalho apresenta metodologia para cálculo do campo magnético produzido por linhas aéreas de transmissão de energia, permitindo avaliação das correntes da linha em diferentes geometrias.

Dentre os métodos empregados em simulação numérica, o EFGM foi pouco utilizado em aplicações para cálculos eletromagnéticos em linhas de transmissão, mesmo com sua vantagem em lidar com geometrias variadas.

(ROSA, 2015) em seu trabalho apresenta uma técnica híbrida, que combina o método sem malha EFGM e o IMLS juntamente com o Método dos Momentos (MoM) para soluções de espalhamento eletromagnético em 2D. Este problema é descrito por um cilindro dielétrico infinito dividido em um cilindro interno e um cilindro externo, onde são aplicados respectivamente o IEFGM e MoM.

(RIBEIRO, 2017) no estudo utiliza o método Galerkin sem malha para problemas de contorno quase-estáticos. A modelagem eletromagnética analítica do campo elétrico em LTs é feita através da Lei de Gauss. Já a do campo magnético é realizada através da lei de Ampère. Em seu trabalho são calculadas as densidades de fluxo magnético associadas às correntes em cada condutor da linha de transmissão.

(RESENDE et al., 2018) No artigo é apresentado o método de Galerkin sem malha sem elementos de interpolação (IEFGM) como uma proposta nova, simples e precisa para a análise de problemas de aterramento eletrostático. Onde a modelagem correta do raio do eletrodo é essencial para garantir a precisão nos resultados. O IEFGM tem mais vantagens nesse caso que o FEM que requer um esforço computacional considerável para geometrias complexas.

1.3 Relevância do trabalho

Existem diferentes possibilidades de técnicas para o cálculo dos campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão. De um modo geral, cada uma têm características próprias, com vantagens e desvantagens. As técnicas analíticas são mais simples, com implementação computacional eficiente, baixo custo computacional, mas não são aplicáveis em situações mais complexas. As técnicas numéricas integrais permitem solucionar uma gama maior de casos, com custo computacional médio, tratando das fronteiras de domínio, mas não são aplicáveis para materiais complexos, não lineares (FARAH, 2014). Sendo assim, as técnicas numéricas diferenciais têm maior facilidade de lidar com geometrias complexas, em uma diversidade ainda maior de problemas, mas com custo computacional mais elevado comparado aos outros métodos.

Devido a crescente utilização do método sem malhas em outros campos da engenharia, como por exemplo a mecânica, e sua principal vantagem de não necessitar de uma malha, permitindo formas variadas, é grande o interesse em fazer um estudo que sintetize e esclareça a aplicação do modelo em campos eletromagnéticos.

A estimativa de campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão

é importantíssimo tanto para novos sistemas, quanto para adequação de sistemas existentes. Então, um modelo computacional pode auxiliar na eficiência e segurança das linhas, e mais.

- A inclusão de mais um método de cálculo apurado para comparação afim de garantir segurança à população em geral nas proximidades de sistemas de transmissão, diminuindo assim os riscos para a saúde, especialmente para ocupações irregulares em áreas de passagem de linhas de transmissão.
- Garantir um ambiente eletromagnético seguro para a indústria e sistemas de comunicação, sem interferências em outros equipamentos em proximidade do sistema elétrico (FARAH, 2014).
- Obtenção de informações mais qualificadas da condição operativa de um sistema de transmissão, verificando se as LTs existentes estão dentro de limites de referência regulamentados.

1.4 Objetivo e justificativa

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver ferramental teórico, analítico e numérico utilizando o método de Galerkin sem elementos (*Element-Free Galerkin Method* - EFGM) para o cálculo da intensidade do campo magnético e os efeitos gerados pelas induções geradas por linhas de transmissão de energia em superfícies condutoras como dutos metálicos, gasodutos, cercas e até mesmo cabos de comunicação.

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos podem ser destacados:

1. Realizar um revisão bibliográfica sobre estudo de campos eletromagnéticos gerados por linha de transmissão, métodos numéricos utilizados aplicações do EFGM;
2. Apresentar a modelagem matemática para a solução do cálculo de intensidade de campo magnético e induções geradas por linhas de transmissão;
3. Desenvolver um programa em Matlab, para modelagem matemática do EFGM;
4. Validar os modelos computacionais comparando os resultados obtidos com a respectiva solução analítica;

O método Galerkin sem elementos foi ainda pouco estudado comparando com outros métodos já consolidados aplicados a problemas de eletromagnetismo como por exemplo o método de elementos finitos, o que faz com que tenha muito a ser pesquisado, desenvolvido e testado.

A pesquisa foi implementada e desenvolvida em ambiente Matlab, de onde foram retirados os resultados para apresentação e conclusão. O estudo servirá como base para próximos estudos de interferências destas linhas ou condutores elétricos em diversificados sistemas.

1.5 Organização do Trabalho

A apresentação do trabalho dar-se-á da seguinte forma incluindo este capítulo de introdução onde foi feita uma contextualização do trabalho, apresentando uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados a linhas de transmissão de energia elétrica, métodos analíticos e métodos numéricos, com atenção especial aos métodos sem malhas e em particular ao EFGM. Além disso, foram citados trabalhos envolvendo interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e duto/estruturas metálicas, bem como seus efeitos, demonstrando a evolução das técnicas e descrevendo a importância do tema e os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2, apresenta os conceitos básicos do EFGM e suas principais características. Uma breve explicação sobre os métodos de aproximação dos Mínimos Quadrados Móveis (MLS) e Mínimos Quadrados Móveis Interpolantes (IMLS), forma fraca e funções peso utilizadas e integrações numéricas e a importância na escolha do método a ser utilizado.

O capítulo 3, apresenta a modelagem matemática do problema proposto, onde são expostas formulação eletromagnética, formulação variacional e o sistema final de equações.

No capítulo 4, são apresentados conceitos importantes relacionados à linha de transmissão, tais como: influências indutivas, parâmetros de entrada do problema, condição de contorno, tratamento de domínio, truncamento de fronteira, defasamento de corrente e raio médio geométrico (RMG).

No capítulo 5, são apresentados os resultados alcançados pelo Método de Galerkin sem Elementos, sendo que primeiramente foi apresentado um exemplo simples para validação de resultados e posteriormente foi simulada um LT trifásica com dados referentes a uma linha real. A pesquisa é desenvolvida em ambiente Matlab, de onde retiramos os resultados para a apresentação e conclusão.

No capítulo 6, são expostas as conclusões, bem como as contribuições desta pesquisa e apresentadas as propostas de continuidade e melhorias.

2 | Métodos sem Malha

2.1 Introdução

Este capítulo descreve conceitos básicos utilizados em métodos sem malha e em particular no *Element-Free Galerkin Method* (EFGM).

2.2 Conceitos básicos

Element-free methods como seu nome bem diz são métodos numéricos que não necessitam de malhas. Eles utilizam uma núvem de pontos espalhados no domínio e em conjunto com as equações diferenciais que regem o problema e as condições de fronteira pertinentes. Este método vem sendo utilizado com frequência para solução de equações diferenciais parciais, em cálculos eletromagnéticos e modelagem de dispositivos elétricos. Uma das principais vantagens desses métodos é a possibilidade de usá-lo em geometrias complexas, obtendo boa precisão e com custo computacional razoável. Podendo fazer uso de uma simples translação de nós para região de interesse. (COPPOLI et al., 2017)(RIBEIRO, 2017)

A introdução dos métodos sem malha em eletromagnetismo foi atribuída a (MARECHAL; COULOMB J. L.; MEUNIER, 1992), quando foi aplicado o *Diffuse Element Method* para simular um problema eletrostático bidimensional. Em seu artigo, o autor apresenta as características promissoras dos métodos sem malha, tais como a não necessidade de se construir malhas e um refinamento da solução em regiões de interesse.

Após o trabalho inicial de Marechal, os estudos dos métodos sem malha em eletromagnetismo se expandiram bastante. Estes estudos constituíram esforços nos mais diversos sentidos, em modelagem de dispositivos eletromagnéticos como transformadores (CINGOSKI et al., 1998), no aumento de precisão para métodos como o EFGM (VIANA; MESQUITA, 1999), trabalhos sobre indução de correntes (XUAN et al., 2004),(XUAN; UDPA, 2004) e (BOTTAUSCIO et al., 2006), na elaboração de métodos híbridos (FEM/EFGM) (CINGOSKI et al., 2000), em problemas de magnetohidrodinâmica

(VERARDI et al., 2002) além de diversas outras aplicações.

Para a construção do modelo matemático deve-se determinar a geometria representando o modelo original do problema. Esta geometria representa o domínio (Ω) do problema limitado por fronteiras (Γ). A partir daí determina-se as equações matemáticas capazes de retratar a geometria do problema no domínio e na fronteira (VIANA, 1998)(RIBEIRO, 2017). Figura 2.1 mostra uma distribuição de nós em 2D, ou seja (x,y) , sobre todo o domínio $\bar{\Omega} = \Omega \cup \Gamma$.

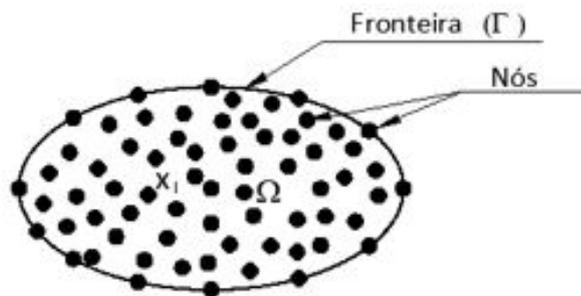


Figura 2.1 – Discretização sem Malha em um domínio 2D (LIU, 2003)

Como a metodologia não necessita de uma malha explícita, torna-se essencial a distribuição de nós pelo domínio do problema, contornos e fronteiras sem necessidade de conexão entre nós, e uma função regida por um Problema de Valor de Contorno (PVC). O método é identificado através da distribuição de nós juntamente com a descrição da condição de contorno do problema e das fronteiras ao longo de todo o domínio (LIU, 2003)(RIBEIRO, 2017).

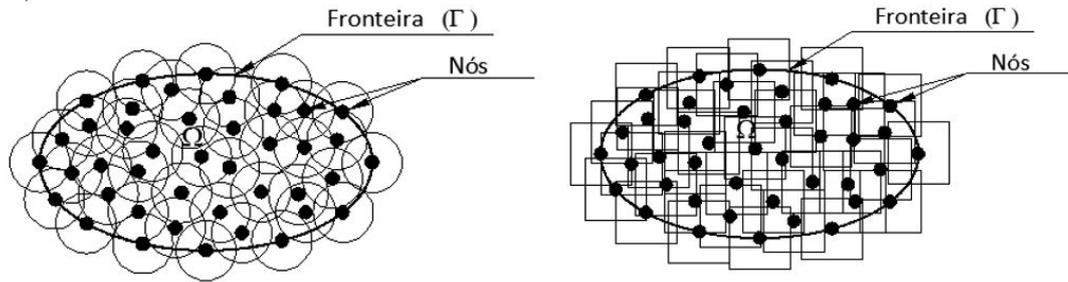
Foram apresentadas importantes definições de conceitos utilizados nestes métodos, tais como domínio de influência e domínio de suporte.

É associado a cada nó um subdomínio fechado, denominado de domínio de influência do nó. O domínio de influência é responsável pela certificação da função de aproximação ao redor do nó I , ele representa a região na qual aquele nó exerce influência (OLIVEIRA, 2016) (RIBEIRO, 2017). A Figura 2.2 ilustrada a seguir mostra que os domínios de influência podem ser sobrepostos uns aos outros, e podem possuir formas circulares ou retangulares, desde que os domínios de influência envolvam todo o domínio do problema.

O domínio de influência de um nó é a região onde este nó exerce influência no domínio do problema (LIU; GU, 2005).

A Figura 2.3 ilustrada a seguir demonstra que os domínios de influência podem ser sobrepostos uns aos outros, este possui formas retangulares.

Conforme a Figura 2.3, para um ponto de interesse "I", a dimensão do domínio



(a) Representação dos domínios de influência circulares de cada nó. (b) Representação dos domínios de influência retangulares de cada nó.

Figura 2.2 – Domínios de influência (RIBEIRO, 2017)

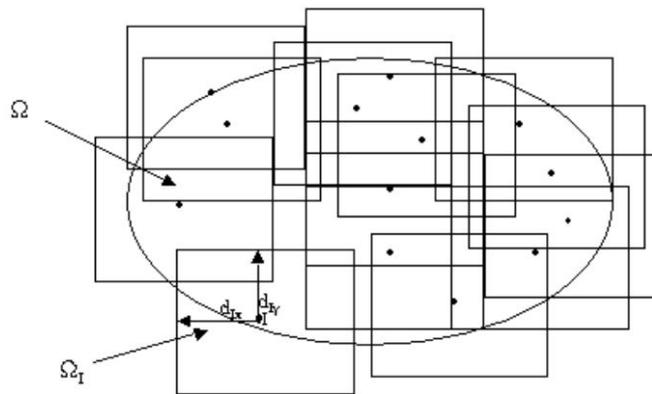


Figura 2.3 – Domínios de influência retangulares. (COPPOLI, 2010)

de influência é:

$$d_I = \alpha_I d_c \tag{2.1}$$

onde (α_I) é um valor adimensional relacionado ao domínio de influência e, d_c é a distância nodal média próxima ao nó de interesse. (COPPOLI, 2010)

Outro conceito importante é o domínio de suporte para um ponto \hat{x} qualquer, dentro do domínio do problema, ele é definido como a região formada pela interseção de todos os domínios de influência que atuam naquele ponto. (COPPOLI, 2010)

2.3 Método de Galerkin sem Elementos (EFGM)

O *Element-Free Galerkin Method* ou método de Galerkin sem elementos foi apresentado em 1994 por (BELYTSCHKO et al., 1994), é um método relativamente novo se comparado a outros métodos já consolidados como o Método de elementos finitos (FEM) e o Método dos Momentos (MOM), já aplicados em problemas eletromagnéticos desde 1965.

O *Element-Free Galerkin Method* pode fazer uso de aproximantes ou interpolantes, por meio do *Moving Least Square* (MLS) ou do *Interpolation Moving Least Square* (IMLS). Sendo um método variacional, estas estruturas são utilizadas na a construção da função de forma. A forma fraca de Galerkin é aplicada para desenvolver o sistema de equações, sendo que as células distribuídas ao longo de todo o domínio são utilizadas para a realização da integração numérica (REZENDE et al., 2015), conforme teoria a seguir.

2.3.1 Método dos Mínimos Quadrados Móveis (MLS)

É o método mais utilizado na construção de funções de forma para métodos sem malha. Sua característica é uma função de aproximação contínua e suave em todo o domínio. (RIBEIRO, 2017) Seja uma função $A(x)$ definida em um domínio (Ω) , sua aproximação em um ponto x pode ser dada como $A^h(x)$. Sua aproximação por MLS pode ser:

$$A^h(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m p_j(\mathbf{x})a_j(\mathbf{x}) \equiv \mathbf{p}^T(\mathbf{x})\mathbf{a}(\mathbf{x}) \quad (2.2)$$

Onde $\mathbf{p}^T(\mathbf{x}) = [1 \ x \ y]$ é uma base polinomial completa, m é a quantidade de funções bases, $\mathbf{x}^T = (x, y)$ é o vetor posição em duas dimensões, e $\mathbf{a}^T(\mathbf{x}) = a_0(\mathbf{x}), a_1(\mathbf{x}), \dots, a_n(\mathbf{x})$ são o vetores de coeficientes.

Como o vetor de coeficientes $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ na equação (2.2) é uma função de (\mathbf{x}) . Os coeficientes de \mathbf{a} são minimizados utilizando a norma discreta ponderada em \mathbf{L}_2 .

$$J = \sum_{i=1}^n \mathbf{W}_i [A^h(\mathbf{x}_i) - A_i]^2 = \sum_{i=1}^n \mathbf{W}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) [A^h(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) - A(\mathbf{x}_i)]^2 = \sum_{i=1}^n \mathbf{W}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) [\mathbf{p}^T(\mathbf{x}_i)\mathbf{a}(\mathbf{x}) - A_i]^2 \quad (2.3)$$

A equação (2.3) é um funcional residual ponderado, e foi construído através de valores aproximados com parâmetros nodais da função desconhecida. Onde n é a quantidade de nós dentro do domínio, associado a função peso. Para a condição estacionária de J referente a $\mathbf{a}(\mathbf{x})$:

$$\frac{\partial J}{\partial a_j} = 0, j = 1, 2 \dots m, \quad (2.4)$$

que resulta no sistema linear:

$$\hat{\mathbf{A}}(\mathbf{x})\mathbf{a}(\mathbf{x}) = \mathbf{B}(\mathbf{x}) \mathbf{A}_s \quad (2.5)$$

onde \mathbf{A} é a matriz de momento definida por::

$$\hat{\mathbf{A}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \mathbf{W}_i(\mathbf{x}) \mathbf{p}(\mathbf{x}_i) \mathbf{p}^T(\mathbf{x}_i) \quad (2.6)$$

e a matriz \mathbf{B} é:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \mathbf{W}(\mathbf{x}) \mathbf{p}^T(\mathbf{x}_i) \quad (2.7)$$

e \mathbf{A}_s é o vetor que armazena os parâmetros nodais da função de campo em todos os nós do domínio de suporte.

Então com a Equação (2.5) para $a(\mathbf{x})$ temos:

$$a(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{A}}^{-1} \mathbf{B}(\mathbf{x}) \mathbf{A}_s \quad (2.8)$$

Obtendo então:

$$A^h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \phi_i A_i \quad (2.9)$$

onde a função de forma para o MLS $\phi_i(\mathbf{x})$ é dada por:

$$\phi_i(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m p_j(\mathbf{x}) (\hat{\mathbf{A}}^{-1}(\mathbf{x}) \mathbf{B}(\mathbf{x}))_{jI} = \mathbf{p}^T \hat{\mathbf{A}}^{-1} \mathbf{B}(\mathbf{x}) \quad (2.10)$$

A função de forma é responsável por fazer a relação nodal, ela possui suporte compacto, permitindo que a matriz do sistema seja uma matriz banda e esparsa e é de grande importância para a precisão da solução do sistema, (PARREIRA, SILVA, et al., 2006) (COPPOLI, 2010)(RIBEIRO, 2017)

A função de forma desenvolvida com o MLS não atende ao delta de Kronecker, então as condições de contorno devem ser realizadas através de multiplicadores de Lagrange ou através do método de Penalidades, modificando a formulação variacional (COPPOLI, 2010)

2.3.2 Método dos Mínimos Quadrados Móveis Interpolantes (IMLS)

O Método dos Mínimos Quadrados Móveis Interpolantes (IMLS) é uma adaptação do MLS indicado no tópico anterior, a fim de garantir a propriedade do delta de Kronecker. O princípio consiste em tornar W_i infinito nos pontos considerados x_i ($i=1, 2, \dots, n$) caso seja necessário interpolar nestes pontos (LANCASTER; SALKASKAS, 1981), ou seja $w_i \rightarrow \infty$ quando $x \rightarrow x_i$.

A Figura 2.4 auxilia a interpretação deste princípio.

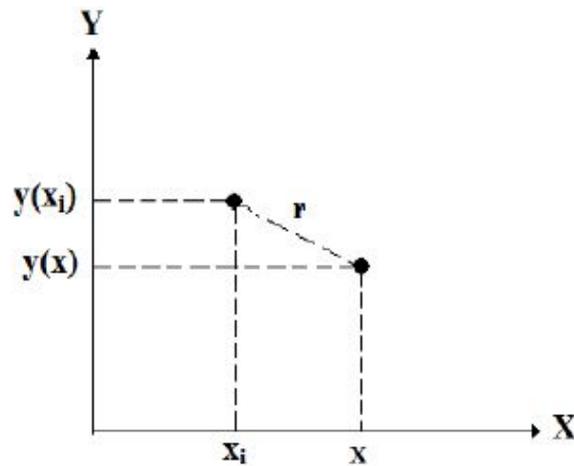


Figura 2.4 – O princípio do Interpolating Moving Least Squares (MARINHO, 2012)

Se $w_i = 1/(x-x_i)^n$. É fácil de se verificar que para $n > 0$, existe uma singularidade na função peso w_i . Conforme (MAISURADZE; THOMPSON, 2003), dentre as maneiras possíveis para se resolver esta questão. Uma delas é utilizando $(x-x_i)^{2n} + \epsilon$ em vez de $(x-x_i)^n$ no denominador da função peso. Neste caso ϵ seria escolhido como um número positivo pequeno, na ordem de 10^{-1} ; por exemplo, de modo a retirar a singularidade da função.

2.3.3 Suporte Compacto e a Função Peso

A função de janela, mais conhecida como função de peso $W(x)$ deve ser diferente de zero apenas em uma região ao entorno de x_i , já apresentado como domínio de influência no nó i . O domínio de influência está diretamente relacionado ao tamanho do raio do suporte (d_i). Modificando este parâmetro a eficiência e precisão dos métodos sem malha sofre alteração, sendo possível aumentar ou diminuir o suporte da função, através de sua dilatação, como pode ser observado na Figura 2.5 esta região é delimitada, e possui suporte compacto (DOLBOW; BELYTSCHKO, 1998) (RIBEIRO, 2017)

Segundo (DOLBOW; BELYTSCHKO, 1998) d_i pode ser encontrado como:

$$d_i = d_{max} C_i \quad (2.11)$$

onde d_{max} é uma constante de proporcionalidade com valores entre $2 \leq d_{max} \leq 4$ e C_i é a distância nodal média entre os nós próximo ao nó de interesse (LIU, 2003). As funções de peso mais comuns são: (LIU; GU, 2005)(RIBEIRO, 2017)

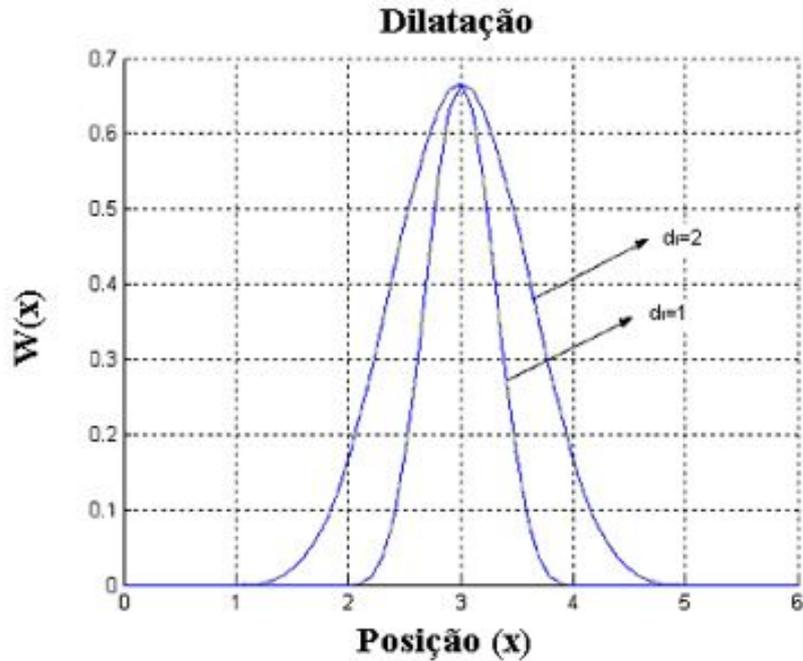


Figura 2.5 – Dilatação da função peso (COPPOLI, 2010)

- Spline Cúbica

$$W(r) = \begin{cases} \frac{2}{3} - 4r^2 + 4r^3 & \text{para } r \leq \frac{1}{2} \\ \frac{4}{3} - 4r + 4r^2 - \frac{4}{3}r^3 & \text{para } \frac{1}{2} < r \leq 1 \\ 0, & \text{para } r > 1 \end{cases} \quad (2.12)$$

- Spline Quadrática

$$W(r) = \begin{cases} 1 - 6r^2 + 8r^3 - 3r^4 & \text{para } r \leq 1 \\ 0, & \text{para } r > 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

- Função Exponencial

$$W(r) = \begin{cases} e^{-\frac{r}{a}^2} & \text{para } r \leq 1 \\ 0, & \text{para } r > 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

Vale observar que nesta dissertação as funções peso utilizadas no MLS foram do tipo spline cúbica Equação (2.12), comum neste tipo de aproximação. Onde $r = |x-x_i|/d_i$ e d_i constitui a dimensão do domínio de influência de cada nó, domínio este que está diretamente relacionado à região em que este nó atuará efetivamente.

No caso do IMLS foram utilizadas funções como a apresentada em (2.15). Nesta equação pode se verificar que a medida que r aumenta a função peso w tende a zero assintoticamente.

$$W(r) = \frac{1}{r^{2n} + \epsilon} \quad (2.15)$$

onde $W(r)$ é a função peso ou janela, n é um número inteiro positivo e r deve ser um número real positivo. Essa função peso torna-se infinita no ponto x_i , garantindo assim que pontos próximos a este nó tenham algum valor e nos demais aproximam-se de zero (ROSA, 2015)(COPPOLI, 2010)(RIBEIRO, 2017).

Uma característica importante relacionada ao tipo de função peso e o modo como a mesma age sobre a esparsidade da matriz. Apesar desta possuir um comportamento assintótico, as funções de forma associadas a elas possuem suporte compacto, uma vez que os domínios de influência de cada nó são limitados. Isto faz garantir a esparsidade do sistema final.

A Figura 2.6 ilustra o comportamento da função MLS e IMLS.

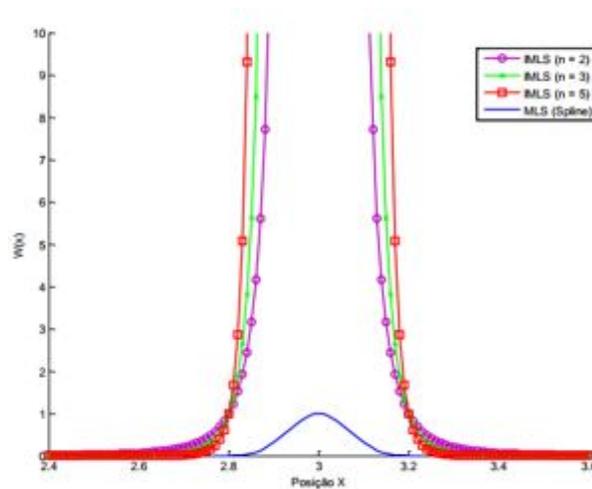


Figura 2.6 – Função Peso IMLS e MLS (RIBEIRO, 2017)

A função peso ilustrada está centralizada no nó referente a posição $x=3$ e domínio de influência com $r=0,3$ e $\epsilon = 10^{-10}$. A curva representada pelo MLS emprega a função peso Spline Quadrática e contém um valor unitário sobre o nó 3, enquanto a função utilizando IMLS possui um valor tendendo ao infinito. Ambas as funções vão para zero, na região externa ao domínio de influência referente ao nó de interesse, satisfazendo a condição do delta de Kronecker. Destaque-se ainda que estas funções peso são de grande importância para elaboração da função de forma presente no método EFGM, influenciando a convergência do método (ROSA, 2015) (RIBEIRO, 2017).

É de extrema importância a criação e escolha das funções de forma nos métodos sem malha. Quanto melhor forem definidos os critérios essenciais e a função de forma, mais fácil será sua implementação e melhor será a precisão nos resultados. (LIU, 2003).

Alguns passos para definir os critérios podem ser levados em conta para melhor satisfação do método: (LIU, 2003)(COPPOLI, 2010).

1 - O método e sua função de forma deverão suportar uma distribuição nodal arbitrária.

2 - A função de forma implementada deverá satisfazer certa ordem de consistência.

3 - O domínio do campo de aproximação/interpolação (domínio de influência) deverá ser pequeno quando comparado ao domínio de todo o problema.

4 - O algoritmo do Método com sua função de forma deverá ser eficiente computacionalmente e, se possível, deverá ser da mesma ordem de complexidade que o do Método de Elementos Finitos.

5 - Preferencialmente a função de forma deverá possuir a propriedade do delta de Kronecker.

6 - O algoritmo do Método com sua devida função de forma deverá ser estável.

7 - Preferencialmente, a aproximação da função através das funções de forma deverá ser compatível ao longo de todo o domínio, ou seja, esta aproximação deverá ser contínua. Esta característica é conhecida como compatibilidade (LIU; GU, 2005).

Proposto em 1915, o método de Galerkin pertence a classe do Método dos Resíduos Ponderados. Buscando solução através de funções de teste, como funções de peso e funções admissíveis e são utilizados em métodos numéricos como FEM e Método sem malha. (JIN, 2002)(LIU, 2003)(RIBEIRO, 2017).

2.3.4 Integração Numérica

Em 1994 Belytschko desenvolveu o EFGM, onde utilizou uma aproximação por *Moving Least Square* (MLS) ou Mínimos Quadrados Móveis para construir a função de forma, sendo o Método de Galerkin utilizado no desenvolvimento do sistema discreto de equações. Para calcular as integrais usadas na montagem do sistema matricial faz-se necessário um conjunto de células de integração distribuídas pelo domínio. (COPPOLI, 2010).

Através da quadratura de Gauss Legendre é realizado a integração ao longo de todo o domínio do problema. Caso algum ponto de integração esteja fora do domínio, o ponto de integração deve ser desconsiderado. (BELYTSCHKO et al., 1994) (RIBEIRO, 2017).

O processo de integração pode ser ajustado, variando parâmetros e influenciando no desempenho do algoritmo. Quanto maior número de pontos de integração normalmente a solução obtida é mais precisa, porém o custo computacional aumenta. A partir de 2 pontos a solução já começa ser aceitável. A partir de 4 pontos de integração já são obtidos resultados mais precisos.

A Figura 2.7 ilustra o domínio de estudo utilizando o MLS, diante da utilização

de células de integração com 4 pontos de integração para cada arranjo e com os nós espalhados pelo domínio.

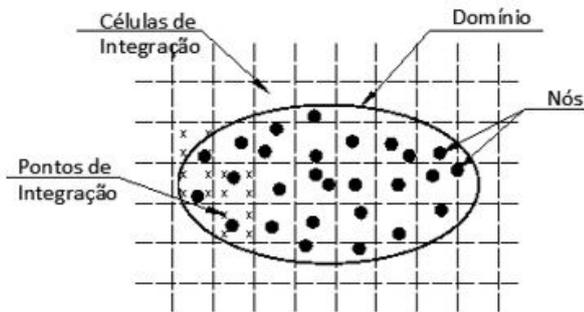


Figura 2.7 – Representação dos pontos de integração aplicados no processo de integração numérica (RIBEIRO, 2017)

2.4 Escolha do Método sem Malha

Em seus trabalhos (LIU, 2003)(COPPOLI, 2010) citam algumas observações sobre o EFGM enumeradas abaixo :

1 - O EFGM se comporta bem tanto para problemas lineares quanto para problemas não lineares. Sua solução converge mais rapidamente que para um problema equivalente em Elementos Finitos.

2 - Muitas das técnicas numéricas empregadas em Elementos Finitos podem ser utilizadas no EFGM para solução de problemas não lineares, realizando-se poucas modificações. A maior diferença está na interpolação da variável potencial.

3 - A função de forma desenvolvida com o MLS não atende ao delta de Kronecker, de modo que a imposição das condições de contorno essenciais deve ser realizada através multiplicadores de Lagrange, pelo Método das Penalidades, através de modificações na formulação variacional.

4 - Dentre os desafios a serem superados com o EFGM estão a remoção das células de integração e fazer com que a função de forma atenda ao delta de Kronecker.

Baseado nas informações sobre os Métodos apresentados, a escolha sobre qual Método utilizar na simulação para análise de contribuição das induções em objetos metálicos próximos à linhas de transmissão energizadas passa pelas características do problema e dos Métodos em si.

Dentre as principais características do modelo podem-se listar:

- 1) Existem fronteiras móveis de geometria relativamente complexa.
- 2) Há diversos tipos de materiais na estrutura.

- 3) O problema é de natureza dinâmica.
- 4) Existem fronteiras periódicas no modelo.
- 5) Dado o grau de complexidade do problema, Métodos comprovadamente estáveis são necessários.

Frente aos problemas enumerados anteriormente e aos Métodos apresentados, pode-se fazer a seguinte análise:

Para fronteiras móveis de geometria relativamente complexa, o problema se enquadra preferencialmente na categoria dos Métodos que tratam a forma fraca de maneira global. Pois evitam uma série de implicações encontradas naqueles que fazem uso de domínio local, como: exigência de uma superposição entre os sub-domínios, para que seja garantida a solução do problema em todo o domínio. Isto consiste em tarefa não trivial quando se considera uma distribuição não uniforme de nós. E devido à superposição, muitas vezes os subdomínios interceptam regiões ou fronteiras que não deveriam, havendo necessidade de se truncar tais subdomínios.

Quanto a natureza dinâmica do problema, nenhum dos Métodos apresentados mostra restrição a esta característica, comportando-se de maneira adequada a variações temporais de suas variáveis (LIU, 2003). (BOTTAUSCIO et al., 2006) apresenta um problema de correntes induzidas, fenômeno que está diretamente relacionado à variação temporal do fluxo magnético relacionada ao EFGM.

Para o tratamento das fronteiras periódicas do problema, os Métodos cujas funções de forma se comportam como o delta de Kronecker serão os mais indicados. Isto é explicado pelo procedimento adotado nesta situação, que passa dentre outros aspectos pela imposição de valores nos nós da fronteira. Esta imposição se assemelha, em parte, à realizada pelo Método de Elementos Finitos quando este impõe suas condições de contorno de Dirichlet. Quanto ao aspecto estabilidade e precisão, seria difícil concluir algo a respeito, pois em geral, os Métodos estudados apresentam boas respostas aos problemas tratados.

Com o exposto até agora, a escolha do Método para o tratamento do problema em questão, induções em objetos metálicos próximos à linhas de transmissão energizadas, deveria recair sobre aqueles que utilizam formas fracas globais, dadas as dificuldades impostas em Métodos que utilizam o outro tipo de formulação. Outro quesito importante seria aquele relacionado às funções de forma, ou seja, o Método deveria atender à propriedade do delta de Kronecker. Além disto, na escolha do Método deveria ser levado em conta a confiabilidade, confirmado por vasta bibliografia.

3 | Modelagem Eletromagnética para Acoplamento Circuito Campo

3.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é introduzir o modelo matemático para acoplamento circuito campo, incluindo a formulação eletromagnética e variacional do problema, cálculo da intensidade de campo magnético e induções geradas por linhas de transmissão em proximidade com objetos metálicos. Foi incluído a modelagem do acoplamento com uma geometria mais simples para título de validação. Após esta validação foi feito a análise para indução de correntes e tensões para modelos mais complexos como por exemplo um duto metálico sob uma linha de transmissão trifásica, conforme intenção do trabalho.

3.2 Linhas de Transmissão

Para o sistema elétrico de potência, as linhas de transmissão são determinantes, pois interligam o sistema elétrico de forma confiável. O desempenho de uma linha de transmissão depende de sua geometria e características (FUCHS, 1977). A Figura 3.1 apresenta os principais componentes das LTs (feixe de condutores das fases, cabos para-raios, espaçadores, cadeia de isoladores e torre) (FARAH, 2014).

Os cabos condutores das fases são os elementos ativos das LTs. Estes são sustentados pelas estruturas das torres por meio de cadeias de isoladores, cuja função é manter os condutores suspensos e isolados eletricamente das estruturas suportes (FARAH, 2014).

As linhas de transmissão são fontes de campos elétricos e magnéticos devido a presença de correntes e tensões. Para ilustrar o problema físico modelado, a Figura 3.2 é considerada. Esta representa uma LT com a existência de distribuições de densidades de corrente de condução nos condutores $J = J_0 e^{j(\omega t + \delta)}$, e sob a presença de meios de

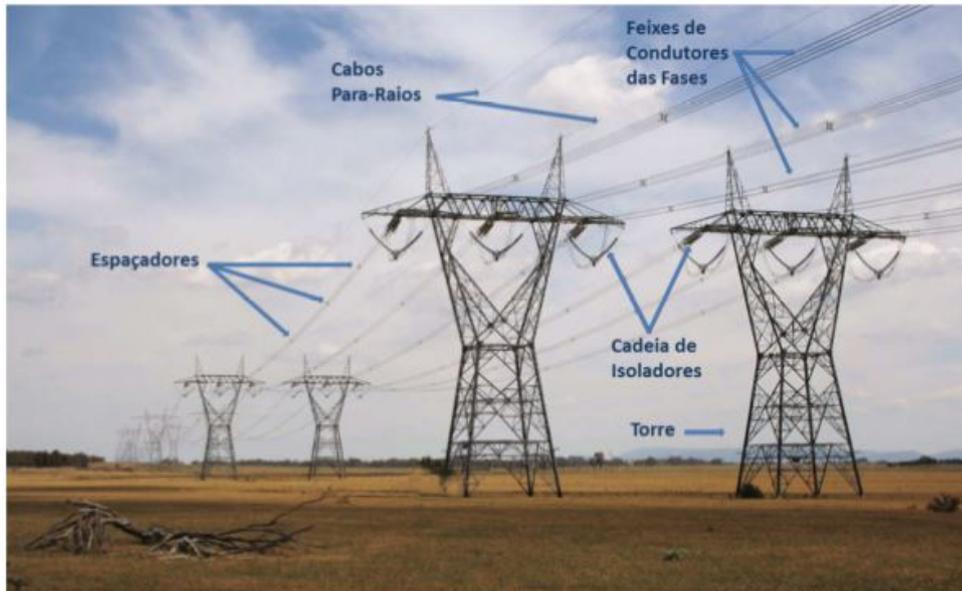


Figura 3.1 – Componentes de Linha de Transmissão (FARAH, 2014)

diferentes permeabilidades μ .

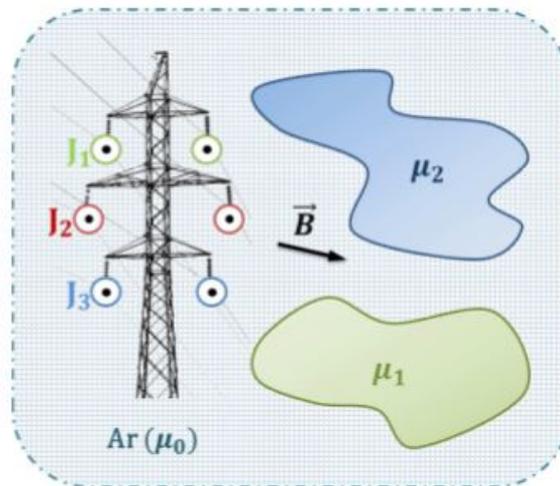


Figura 3.2 – Domínio Genérico com Presença de Densidades de Corrente Transversais (FARAH, 2014).

3.3 Acoplamento Indutivo

Linhas de transmissão de Alta Tensão podem gerar três tipos de acoplamentos: capacitivo, indutivo e condutivo. Sobre condições de falta, a indução de tensão sobre objetos metálicos pode ter uma magnitude de centenas de volts até quilovolts. Em condições normais de operação, estas influências normalmente são baixas, mas podem causar problemas. (AL-GAHTANI, 2009)

No estudo foi avaliado o acoplamento indutivo. Objetos metálicos como: dutos, pipelines, cercas ou até mesmo cabos de comunicação paralelos à linha de transmissão, estão sujeitos a tensões induzidas causadas por campos magnéticos variando no tempo produzidos pela linha de transmissão, conforme Figura 3.3.

A influência indutiva da linha de transmissão próxima ao objeto metálico depende basicamente de três parâmetros:

- Corrente da Linha de transmissão e condições de operação. Em situação de falta, a indução depende da corrente de falta. A tensão induzida pode ser muito alta, mas sua duração é curta.
- Distância entre a Linha de transmissão e o objeto metálico. A separação entre a LT e o objeto é um importante fator de influência no nível de tensão induzido, que reduz com o aumento da distância entre os mesmos.
- Comprimento de exposição. É a distância em que o objeto metálico fica exposto paralelo a LT e em ocorrência de falta, tenha um retorno da terra maior que 10 V/km x kA, ou seja quando 1 kA de retorno produz uma força eletromotriz maior que 10 V/km.

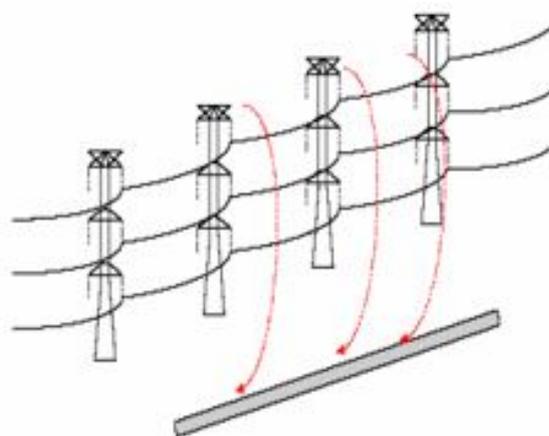


Figura 3.3 – Acoplamento Indutivo (AL-GAHTANI, 2009).

Para cabos de comunicação, o fluxo magnético produzido pela linha de transmissão pode induzir tensão de ruído em um cabo de comunicação adjacente, gerando uma corrente de loop no circuito afetado.

A linha de transmissão pode ser representada adequadamente em duas dimensões.

Para análise dos campos magnéticos são importantes alguns parâmetros, tais como: condições de contorno, tratamento de domínio aberto, truncamento de fronteira, indução de corrente, para que possamos avaliá-los.

3.4 Equações de Maxwell

As linhas de transmissão, máquinas elétricas, transformadores são fontes de campos elétricos e magnéticos devido a presença de correntes e tensões. O objetivo desta seção é apresentar o modelo matemático para acoplamentos circuito campo empregando o EFGM, que consiste da formulação eletromagnética e variacional do referido problema e as leis de Kirchoff associadas. Para tal, são utilizadas as equações de Maxwell e as relações constitutivas:

Lei de Faraday:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (3.1)$$

Lei de Ampère:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} \quad (3.2)$$

Lei de Gauss do Magnetismo:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.3)$$

Lei de Gauss da Eletricidade:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.4)$$

A lei de Faraday (3.1), descreve como densidades de fluxo magnético \mathbf{B} produzem distribuições espaciais de campos elétricos \mathbf{E} . A lei de Ampere (3.2) descreve como densidades de correntes de condução \mathbf{J} e densidades de fluxo elétrico \mathbf{D} produzem distribuições espaciais de campos magnéticos \mathbf{H} . A lei de Gauss do magnetismo (3.3) afirma a conservação do fluxo magnético. Por fim, a lei de Gauss da eletricidade (3.4) associa a densidade de fluxo elétrico as densidades espaciais de cargas elétricas ρ existentes. É ainda percebido que as equações (3.1) e (3.2) demonstram a interdependência dos campos elétricos e magnéticos, quando em suas formas harmônicas temporais (FARAH, 2014).

3.5 Formulação Clássica para cálculo do Campo Magnético

A formulação clássica de um problema físico consiste em caracterizá-lo em termos de equações diferenciais, parciais ou não, acompanhado de condições de contorno e interface.

Para formular os problemas de interesse pode-se partir de um problema de geometria simples, bidimensional, onde geometria, campos e demais grandezas não variam em z , porém com estrutura matemática que pode ser aplicada a problemas complexos (VIANA, 1998).

O modelo matemático para cálculo do campo magnético inicia-se a partir da Lei de Ampère de Maxwell, dada pela equação (3.2) apresentada a seguir na forma diferencial (JIN, 2002).

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_t + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.5)$$

Como a análise do campo magnético é feito sob a perspectiva quase-estática, a corrente de deslocamento ($\partial D/\partial t = j\omega D$), pode ser desprezada, devido a corrente de deslocamento ser muito menor que a corrente de condução ($j\omega D \ll J_t$) (COPPOLI, 2010) (RIBEIRO, 2017).

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_t \quad (3.6)$$

Devem ser consideradas algumas relações para associar comportamento dos campos à diferentes materiais. Em um meio linear (em que a densidade de fluxo seja proporcional ao campo aplicado), homogêneo (em que a característica não varie com as coordenadas do domínio) e isotrópico (em que a propriedade física independe da direção analisada), tal como considerado, as relações constitutivas são dadas pelas seguintes equações (BALANIS, 2012):

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{H} = \nu \mathbf{B} \quad (3.10)$$

Sendo: \mathbf{B} indução magnética (weber/metro²), \mathbf{H} é a intensidade de campo magnético (ampère/metro) e ν é a relutividade do material ($\nu = 1/\mu$) (ampère x metro/weber) (MACEDO, 1988) (BALANIS, 2012)(FARAH, 2014)(COPPOLI, 2010). Onde:

ϵ - permissividade,

μ - permeabilidade,

σ – condutividade.

A solução das equações de Maxwell, somadas às relações constitutivas e de interfaces, em cada problema específico não é trivial, devido à necessidade de desenvolvimento de derivadas parciais, espaciais (em mais de uma dimensão), univocamente (SADIKU, 2004)(FARAH, 2014).

3.5.1 Formulação para o Potencial Magnético Utilizando Discretização Temporal

Considere um problema genérico conforme mostrado na Figura 3.4.

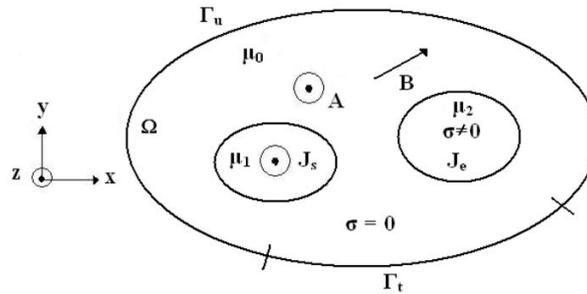


Figura 3.4 – Domínio bidimensional com suas fronteiras, materiais, fonte de corrente e corrente induzida. (COPPOLI, 2010)

Fazendo-se uso das equações Equação (3.10) e Equação (3.5) e sabendo-se que; $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, onde \mathbf{A} é o potencial vetor magnético obtém-se:

$$\nabla \times \nu \mathbf{B} = \nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_t \quad (3.11)$$

Fazendo $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ e sabendo que \mathbf{J}_t e \mathbf{A} são perpendiculares ao plano de interesse, então $\mathbf{A} = A_k$ e $\mathbf{J} = J_k$.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \mathbf{A} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_x i + \mathbf{B}_y j = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} i + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} j \quad (3.13)$$

Substituindo a Equação (3.13) na equação Equação (3.11), resulta a equação de Poisson (MACEDO, 1988) (COPPOLI, 2010) (RIBEIRO, 2017):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\mathbf{J}_t \quad (3.14)$$

Considerando \mathbf{J}_t como a corrente total presente,

$$\mathbf{J}_t = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e \quad (3.15)$$

onde \mathbf{J}_s é o vetor densidade de corrente (ampère/metro²) referente à corrente imposta e \mathbf{J}_e é o vetor densidade de corrente induzida (ampère/metro²).

$$\nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e \quad (3.16)$$

Sendo:

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} \quad (3.17)$$

Onde \mathbf{E} é o campo elétrico induzido e dado em (volt/metro).

Das equações de Maxwell tem-se que:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{A}) \quad (3.18)$$

ou

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.19)$$

Daí conclui-se que:

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla V \quad (3.20)$$

Considerando somente o campo elétrico induzido \mathbf{E} , que devido a variação temporal de \mathbf{B} tem-se que $\nabla V=0$ conforme (BASTOS; SADOWSKI, 2003), logo:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.21)$$

ou

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.22)$$

Vale observar que ∇V não será considerado nulo na Subseção 3.6.2, onde foi calculada a queda de tensão no objeto metálico maciço.

Substituindo as equações (3.21) e (3.22) em (3.16):

$$\nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{J}_s = 0 \quad (3.23)$$

Quando existe somente a componente “Z” do potencial vetor magnético \mathbf{A} , o mesmo pode ser tratado como um escalar. Desta forma (3.23) torna-se:

$$\nabla \cdot \nu \nabla \mathbf{A} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{J}_s = 0 \quad (3.24)$$

ou

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \cdot \nu \nabla \mathbf{A} = \mathbf{J}_s(t) \quad (3.25)$$

Vale observar que devem ser aplicadas as seguintes condições de contorno de Dirichlet (condição de contorno essencial) e Neumann (condição de contorno natural):

$$A = A_u \quad em \quad \Gamma_u, \quad (3.26)$$

$$-\nu \frac{\partial A}{\partial n} = \tilde{t} \quad em \quad \Gamma_t \quad (3.27)$$

onde n é a orientação normal à fronteira de Neumann Γ_t , apontando para fora da mesma.

Nesta Figura 3.4, Γ_u e Γ_t ilustra a fronteira de Dirichlet e Neumann respectivamente.

3.5.2 Formulação Variacional

Considerando as equações (3.25), (3.26) e (3.27) o problema fica definido em sua forma forte. A forma forte apresenta uma solução complexa, então é necessário a obtenção da forma fraca que garante uma boa aproximação, a formulação variacional do problema e aplicar o método de Galerkin.

A função de ponderação também chamada de função teste ou peso ω , pode ser qualquer função suficientemente regular, com domínio em Ω , para que a equação integral tenha sentido. Estabelece-se ainda, que as funções teste devem se anular na fronteira Γ_u do domínio (MESQUITA, 1990).

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A} - \nabla \cdot \nu \nabla A - J_s(t)) \omega d\Omega = 0 \quad \forall \omega \in H^1, \quad (3.28)$$

Sendo $\partial A / \partial t = \dot{A}$:

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A}) \omega d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \cdot (\nu \nabla A)) \omega d\Omega - \int_{\Omega} (J_s(t)) \omega d\Omega = 0 \quad \forall \omega \in H^1, \quad (3.29)$$

Manipulando a equação (3.29) e fazendo uso das identidades vetoriais (COPPOLI, 2010) (RIBEIRO, 2017):

$$\nabla \cdot (g\nu) = (\nabla g)\nu + g\nabla \cdot \nu \quad (3.30)$$

$$g\nabla \cdot \nu = \nabla \cdot (g\nu) - (\nabla g)\nu \quad (3.31)$$

Substituindo $g=\omega$ e $\nu = \nabla A$ na equação (3.31):

$$\nabla \cdot (\nu \nabla A)\omega = \nabla \cdot (\omega \nu \nabla A) - \nabla \omega (\nu \nabla A) \quad (3.32)$$

Em seguida o resultado de (3.29) é modificado de acordo com (3.32)

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A})\omega d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \cdot (\omega \nu \nabla A))d\Omega + \int_{\Omega} (\nu \nabla \omega \nabla A)d\Omega - \int_{\Omega} J_s(t)\omega d\Omega = 0 \quad \forall \omega \in H^1, \quad (3.33)$$

Aplicando o teorema da divergência no segundo termo de (3.33) e como $(\partial A/\partial n = \nabla A \cdot n)$, sendo n um vetor unitário normal, apontado para fora da fronteira de Neumann Γ_t , chega-se a:

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A})\omega d\Omega - \int_{\Gamma} \left(\omega \nu \frac{\partial A}{\partial n} \right) d\Gamma + \int_{\Omega} (\nu \nabla \omega \nabla A)d\Omega - \int_{\Omega} J_s(t)\omega d\Omega = 0 \quad \forall \omega \in H^1, \quad (3.34)$$

em que $\Gamma = \Gamma_u \cup \Gamma_t$, e sendo $\omega = 0$ em Γ_u e $-\nu \frac{\partial A}{\partial n} = \tilde{t}$ em Γ_t , deseja-se agora determinar $A \in H^1$, de maneira que:

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A})\omega d\Omega + \int_{\Gamma_t} (\omega \tilde{t})d\Gamma + \int_{\Omega} (\nu \nabla \omega \nabla A)d\Omega - \int_{\Omega} J_s(t)\omega d\Omega = 0 \quad \forall \omega \in H^1, \quad (3.35)$$

Baseando-se em uma solução aproximada, determinando: $A^h \in \widehat{H}^1$:

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A}^h)\omega^h d\Omega + \int_{\Gamma_t} (\omega^h \tilde{t})d\Gamma + \int_{\Omega} (\nu \nabla \omega^h \nabla A^h)d\Omega - \int_{\Omega} J_s(t)\omega^h d\Omega = 0 \quad \forall \omega \in H^1, \quad (3.36)$$

onde $\widehat{H}^1 \subset H^1$, sendo ainda aplicado o método de Galerkin:

$$A^h = \sum_{i=1}^n A_i \phi_i, \quad (3.37)$$

$$\dot{A}^h = \sum_{i=1}^n \dot{A}_i \phi_i, \quad (3.38)$$

$$\omega^h = \sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i, \quad (3.39)$$

Adicionando as equações (3.37), (3.38) e (3.39) em (3.36):

$$\begin{aligned} - \int_{\Omega} (J_s(t) \sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i) d\Omega + \int_{\Omega} (\sigma \sum_{j=1}^n \dot{A}_j \sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i) d\Omega + \int_{\Gamma_t} (\sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i \tilde{t}) d\Gamma \\ + \int_{\Omega} (\nu \nabla \sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i \nabla \sum_{j=1}^n A_j \phi_j) d\Omega = 0 \quad \forall \omega_i \in \widehat{H}^1. \end{aligned} \quad (3.40)$$

Fazendo o rearranjo de termos:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \omega_i \sum_{j=1}^n \int_{\Omega} (\dot{A}_j \sigma \phi_i) d\Omega + \int_{\Omega} (\nabla \phi_j \nu \nabla \phi_i A_j) d\Omega + \int_{\Gamma_t} (\phi_i \tilde{t}) d\Gamma \\ - \int_{\Omega} (J_s(t) \phi_i) d\Omega = 0 \quad \forall \omega_i \in \widehat{H}^1. \end{aligned} \quad (3.41)$$

sendo:

$$\begin{aligned} G_i = \sum_{j=1}^n \int_{\Omega} (\dot{A}_j \sigma \phi_i) d\Omega + \int_{\Omega} (\nabla \phi_j \nu \nabla \phi_i A_j) d\Omega + \int_{\Gamma_t} (\phi_i \tilde{t}) d\Gamma \\ - \int_{\Omega} (J_s(t) \phi_i) d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (3.42)$$

Fazendo:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i G_i = 0 \quad \forall \omega_i \in \widehat{H}^1 \rightarrow G_i = 0, \quad (3.43)$$

na equação (3.41) e chamando

$$N_{ij} = \int_{\Omega} \phi_j \sigma \phi_i d\Omega, \quad (3.44)$$

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \nabla \phi_j \nu \nabla \phi_i d\Omega, \quad (3.45)$$

$$F_i = \int_{\Omega} J_s(t) \phi_i d\Omega - \int_{\Gamma} (\phi_i \tilde{t}) d\Gamma, \quad (3.46)$$

Chega-se no seguinte sistema linear

$$\mathbf{N}\dot{\mathbf{A}} + \mathbf{K}\mathbf{A} = \mathbf{F} \quad (3.47)$$

onde $\dot{\mathbf{A}}$ e \mathbf{A} são vetores.

3.5.3 Discretização no Tempo

Para se discretizar a equação (3.47) no tempo, utiliza-se o algoritmo θ (BASTOS; SADOWSKI, 2003), conforme descrito a seguir:

No algoritmo θ , uma variável X no instante $t + \Delta t$ é dada por:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + [(1 - \theta)\dot{X}(t) + \theta\dot{X}(t + \Delta t)]\Delta t. \quad (3.48)$$

onde $X(t)$ é o valor de X no tempo t , Δt é o espaço de tempo e $0 < \theta \leq 1$. De onde é obtido a aproximação de Euler (BASTOS; SADOWSKI, 2003) ou

$$[(1 - \theta)\dot{X}(t) + \theta\dot{X}(t + \Delta t)] = \frac{X(t + \Delta t) - X(t)}{\Delta t}. \quad (3.49)$$

Considerando o instante t em (3.47) tem-se:

$$\mathbf{N}\dot{\mathbf{A}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{A}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3.50)$$

e para $t + \Delta t$

$$\mathbf{N}\dot{\mathbf{A}}(t + \Delta t) + \mathbf{K}\mathbf{A}(t + \Delta t) = \mathbf{F}(t + \Delta t) \quad (3.51)$$

Multiplicando (3.50) por $(1 - \theta)$ e (3.51) por θ

$$(1 - \theta)\mathbf{N}\dot{\mathbf{A}}(t) + (1 - \theta)\mathbf{K}\mathbf{A}(t) = (1 - \theta)\mathbf{F}(t) \quad (3.52)$$

$$\theta\mathbf{N}\dot{\mathbf{A}}(t + \Delta t) + \theta\mathbf{K}\mathbf{A}(t + \Delta t) = \theta\mathbf{F}(t + \Delta t) \quad (3.53)$$

Somando (3.52) com (3.53)

$$\mathbf{N}[(1 - \theta)\dot{\mathbf{A}}(t) + \theta\dot{\mathbf{A}}(t + \Delta t)] + (1 - \theta)\mathbf{K}\mathbf{A}(t) + \theta\mathbf{K}\mathbf{A}(t + \Delta t) = (1 - \theta)\mathbf{F}(t) + \theta\mathbf{F}(t + \Delta t) \quad (3.54)$$

Utilizando (3.49), o primeiro termo do lado esquerdo de (3.54) pode ser escrito como:

$$\mathbf{N}[(1 - \theta)\dot{\mathbf{A}}(t) + \theta\dot{\mathbf{A}}(t + \Delta t)] = \mathbf{N}\frac{\mathbf{A}(t + \Delta t) - \mathbf{A}(t)}{\Delta t} \quad (3.55)$$

Substituindo (3.55) em (3.54):

$$\mathbf{N}\frac{\mathbf{A}(t + \Delta t) - \mathbf{A}(t)}{\Delta t} + (1 - \theta)\mathbf{K}\mathbf{A}(t) + \theta\mathbf{K}\mathbf{A}(t + \Delta t) = (1 - \theta)\mathbf{F}(t) + \theta\mathbf{F}(t + \Delta t) \quad (3.56)$$

$$\mathbf{N}\frac{\mathbf{A}(t + \Delta t) - \mathbf{A}(t)}{\Delta t} + \mathbf{K}[(1 - \theta)\mathbf{A}(t) + \theta\mathbf{A}(t + \Delta t)] = (1 - \theta)\mathbf{F}(t) + \theta\mathbf{F}(t + \Delta t) \quad (3.57)$$

Para $\theta = 1$ chega-se à aproximação de Euler (COPPOLI, 2010):

$$\mathbf{N}\frac{\mathbf{A}(t + \Delta t) - \mathbf{A}(t)}{\Delta t} + \mathbf{K}\mathbf{A}(t + \Delta t) = \mathbf{F}(t + \Delta t) \quad (3.58)$$

e

$$\underbrace{(\mathbf{N} + \mathbf{K}\Delta t)}_{KK} \mathbf{A}(t + \Delta t) = \underbrace{\mathbf{N}\mathbf{A}(t) + \Delta t\mathbf{F}(t + \Delta t)}_{Força} \quad (3.59)$$

o sistema final é dado por:

$$KK[\mathbf{A}(t + \Delta t)] = \mathbf{Força} \quad (3.60)$$

3.6 Modelagem para Indução

3.6.1 Região fora do objeto metálico

Com desenvolvimento similar ao da seção anterior, agora sem o termo referente às correntes e tensões induzidas, uma vez que a análise será feita próximo ao objeto metálico.

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (3.61)$$

e

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (3.62)$$

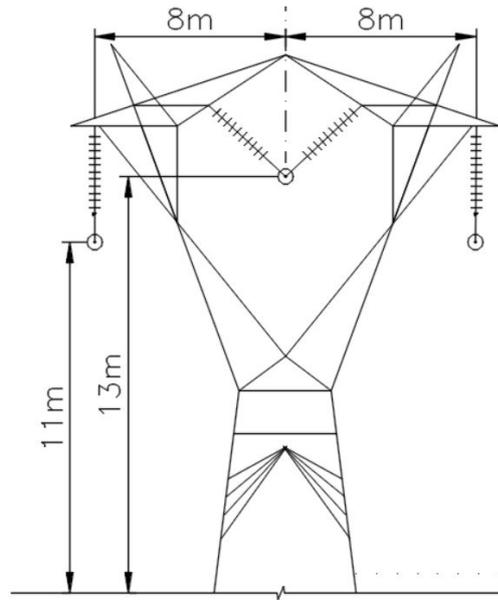


Figura 3.5 – Linha de Transmissão

tem-se que:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \nabla V \quad (3.63)$$

Com a relação constitutiva

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.64)$$

Substituindo (3.63) em $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ chega-se a:

$$\nabla \times [\nu \nabla \times \mathbf{A}] = -\sigma \nabla V \quad (3.65)$$

Como feito na seção 3.5.1, a indução magnética pode ser reduzida às componentes "x" e "y", conseqüentemente o potencial vetor magnético e a densidade de corrente possuirão somente componentes na direção "z", ou seja, $\mathbf{A} = A_k$ e $\mathbf{J} = J_k$. Como observação, o termo $-\sigma \nabla V$ representa a corrente imposta no circuito e será substituída por J_s .

Logo a (3.65) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = J_s \quad (3.66)$$

Observadas as condições de contorno de Diriclet, Neumann (3.66) será tratada como foi feito para (3.14).

3.6.2 Região do objeto metálico

A Figura 3.6 representa o objeto metálico, que pode ser um duto, cerca, gasoduto, etc... onde " S_t " é a seção do objeto, " l " seu comprimento e " σ " sua condutividade.

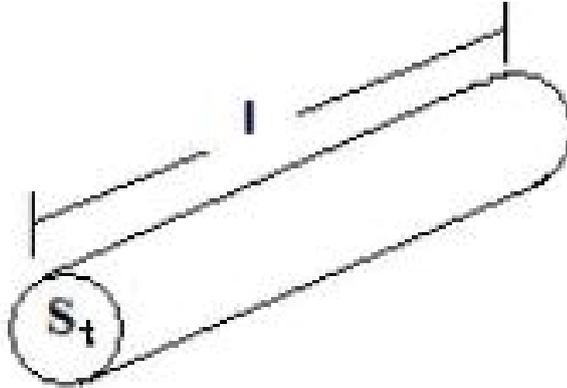


Figura 3.6 – Objeto metálico - condutor (COPPOLI, 2010).

A diferença de potencial entre terminais do condutor é dada por:

$$U_t = \int_0^l -(\nabla V) \mathbf{dl} \quad (3.67)$$

De (3.67) pode-se adotar a seguinte aproximação para o condutor em questão

$$\nabla V = -\frac{U_t}{\mathbf{l}} \quad (3.68)$$

Utilizando (3.63) porém acrescentando-se o termo relativo às correntes induzidas - $\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$, uma vez que se está analisando a região do material metálico, ou seja:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = \sigma \left[-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \right] \quad (3.69)$$

logo:

$$I_t = \int_{S_t} \mathbf{J} dS = - \int_{S_t} \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} dS + \int_{S_t} \sigma \frac{U_t}{l} dS \quad (3.70)$$

Conforme foi dito, o potencial magnético e a densidade de corrente possuirão somente componentes na direção "z", então foi possível tratar como escalar.

Considerando a resistência do material metálico como

$$R_t = \frac{l}{\sigma S_t} \quad (3.71)$$

Utilizando (3.71), a equação (3.70) puderam ser escrita como:

$$I_t = \frac{U_t}{R_t} - \int_{S_t} \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dS \quad (3.72)$$

As equações finais para o objeto metálico/condutor foram dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right] - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \frac{U_t}{l} = 0 \quad (3.73)$$

e

$$U_t = R_t I_t + R_t \int_{S_t} \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dS \quad (3.74)$$

A equação (3.74) mostra que a tensão sobre o objeto/condutor é constituída pela queda de tensão devida à resistência, $R_t I_t$, e pela queda de tensão devida às correntes induzidas do tipo eddy currents $R_t \int_{S_t} \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dS$.

Desenvolvendo similar ao que foi feito em (3.23) na equação (3.73) fazendo substituição de J_s por $\sigma \frac{U_t}{l}$ tem-se a forma fraca:

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A}) \omega d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \cdot (\omega \nu \nabla A)) d\Omega + \int_{\Omega} (\nu \nabla \omega \nabla A) d\Omega - \int_{\Omega} \left(\sigma \frac{U_t}{l} \right) \omega d\Omega = 0 \quad \forall \omega \in H^1, \quad (3.75)$$

Aplicando o teorema da divergência na primeira parcela da equação (3.75), e considerando que $(\partial A / \partial n = \nabla \mathbf{A} \cdot \mathbf{n})$ onde \mathbf{n} é um vetor unitário normal, apontando para fora da fronteira de Neumann, resulta em:

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A}) \omega d\Omega - \int_{\Gamma} \left(\omega \nu \frac{\partial A}{\partial n} \right) d\Gamma + \int_{\Omega} (\nu \nabla \omega \nabla A) d\Omega - \int_{\Omega} \left(\sigma \frac{U_t}{l} \right) \omega d\Omega = 0 \quad \forall \omega \in H^1, \quad (3.76)$$

em que $\Gamma = \Gamma_u \cup \Gamma_t$, e sendo $\omega = 0$ em Γ_u e $-\nu \frac{\partial A}{\partial n} = \tilde{t}$ em Γ_t , deseja-se agora determinar $A \in H^1$, de maneira que:

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A}) \omega d\Omega + \int_{\Gamma_t} (\omega \tilde{t}) d\Gamma + \int_{\Omega} (\nu \nabla \omega \nabla A) d\Omega - \int_{\Omega} \left(\sigma \frac{U_t}{l} \right) \omega d\Omega = 0 \quad \forall \omega \in H^1, \quad (3.77)$$

Para o problema aproximado tem-se:

$$\int_{\Omega} (\sigma \dot{A}^h) \omega^h d\Omega + \int_{\Gamma_t} (\omega^h \tilde{t}) d\Gamma + \int_{\Omega} (\nu \nabla \omega^h \nabla A^h) d\Omega - \int_{\Omega} \left(\sigma \frac{U_t}{l} \right) \omega^h d\Omega = 0 \quad \forall \omega^h \in \widehat{H}^1 \quad (3.78)$$

Onde $\widehat{H}^1 \subset H^1 e$:

$$A^h = \sum_{i=1}^n A_i \phi_i, \quad (3.79)$$

$$\dot{A}^h = \sum_{i=1}^n \dot{A}_i \phi_i, \quad (3.80)$$

$$\omega^h = \sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i, \quad (3.81)$$

Adicionando as equações (3.79), (3.80) e (3.81) em (3.78):

$$\begin{aligned} - \int_{\Omega} \left(\sigma \frac{U_t}{l} \sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i \right) d\Omega + \int_{\Omega} \left(\sigma \sum_{j=1}^n \dot{A}_j \phi_j \sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i \right) d\Omega + \int_{\Gamma_t} \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i \tilde{t} \right) d\Gamma \\ + \int_{\Omega} \left(\nu \nabla \sum_{i=1}^n \omega_i \phi_i \nabla \sum_{j=1}^n A_j \phi_j \right) d\Omega = 0 \quad \forall \omega_i \in \widehat{H}^1. \end{aligned} \quad (3.82)$$

Fazendo o rearranjo de termos:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \omega_i \sum_{j=1}^n \int_{\Omega} (\dot{A}_j \phi_j \sigma \phi_i) d\Omega + \int_{\Omega} (\nabla \phi_j \nu \nabla \phi_i A_j) d\Omega + \int_{\Gamma_t} (\phi_i \tilde{t}) d\Gamma \\ - \int_{\Omega} \left(\sigma \frac{U_t}{l} \right) \phi_i d\Omega = 0 \quad \forall \omega_i \in \widehat{H}^1. \end{aligned} \quad (3.83)$$

Fazendo:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i G_i = 0 \quad \forall \omega_i \in \widehat{H}^1 \rightarrow G_i = 0 \quad (3.84)$$

$$\begin{aligned} G_i = \sum_{j=1}^n \int_{\Omega} (\dot{A}_j \phi_j \sigma \phi_i) d\Omega + \int_{\Omega} (\nabla \phi_j \nu \nabla \phi_i A_j) d\Omega + \int_{\Gamma_t} (\phi_i \tilde{t}) d\Gamma \\ - \int_{\Omega} \left(\sigma \frac{U_t}{l} \right) \phi_i d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (3.85)$$

na equação (3.83) e chamando

$$N_{ij} = \int_{\Omega} \phi_j \sigma \phi_i d\Omega \quad (3.86)$$

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \nabla \phi_j \nu \nabla \phi_i d\Omega \quad (3.87)$$

$$P_i = \int_{\Omega} \left(\sigma \frac{1}{l} \right) \phi_i d\Omega \quad (3.88)$$

e

$$T_i = \int_{\Gamma_t} (\phi_i \tilde{t}) d\Gamma \quad (3.89)$$

Chega-se no seguinte sistema linear

$$\mathbf{N}\dot{\mathbf{A}} + \mathbf{K}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{U}_t + \mathbf{T} = 0 \quad (3.90)$$

Onde \mathbf{K} é a matriz de rigidez associada às derivadas das funções de forma e à relutividade do material " ν ". \mathbf{N} é a matriz associada às funções de forma e a condutividade do material " σ ", \mathbf{A} é o potencial vetor magnético nos nós e \mathbf{U}_t é o vetor de tensão nos terminais do objeto metálico.

Com a formulação definida é necessário a modelagem computacional aplicando o método de Galerkin sem malhas (EFGM). Foi utilizado o Matlab como ferramenta para elaboração do programa.

ou seja:

$$N_{kj} = \int_{\Omega} \phi_k^t \sigma \phi_j d\Omega \quad (3.91)$$

$$K_{kj} = \int_{\Omega} \nabla \phi_k^t \nu \nabla \phi_j d\Omega \quad (3.92)$$

$$P_{kj} = \int_{\Omega} \left(\sigma \frac{1}{l} \right) \phi_k d\Omega \quad (3.93)$$

Obs.: Se o nó "k" estiver fora da região do objeto metálico "j", $P_{k,j} = 0$.

Aplicando (3.80) em (3.74) chega-se a:

$$U_t = R_t I_t + R_t \int_{S_t} \sigma \sum_{i=1}^n \dot{A}_i \phi_i dS \quad (3.94)$$

Considerando "n" objetos metálico/cerca chega-se a:

$$\mathbf{Q}\dot{\mathbf{A}} + \mathbf{R}\mathbf{I}_t = \mathbf{U}_t \quad (3.95)$$

onde

$$R_t = \frac{l}{\sigma S_t} \quad (3.96)$$

R_t é a resistência "cd" do objeto metálico

e

$$Q_{k,j} = \int_{\Omega} R_{tk} \sigma_k \phi_k d\Omega \quad (3.97)$$

Se o nó "j" não pertencer ao objeto metálico "k", $Q_{k,j} = 0$.

3.6.3 Equações finais circuito-campo

Utilizamos as equações das seções 3.4, 3.5 e 3.6, chega-se às equações para indução:

$$\mathbf{N}\dot{\mathbf{A}} + \mathbf{K} - \mathbf{P}\mathbf{U}_t - \mathbf{J} + \mathbf{T} = 0 \quad (3.98)$$

$$\mathbf{Q}\dot{\mathbf{A}} - \mathbf{U}_t + \mathbf{R}\mathbf{I}_t = 0 \quad (3.99)$$

$$\mathbf{U}_t(t) + \left(R_{ext} + L_{ext} \frac{d}{dt} \right) \mathbf{I}_t(t) = \mathbf{E}_f(t) \quad (3.100)$$

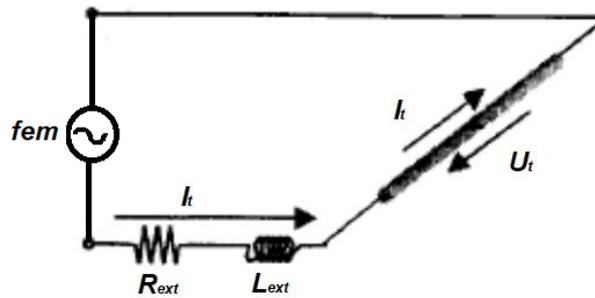


Figura 3.7 – Condutor sólido em série (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

Onde $E_f = fem$ constitui uma fonte de tensão externa.

$$J = \int_{\Omega} J_f(t) \phi_t d\Omega \quad (3.101)$$

Utilizando o algoritmo θ em (3.98), de modo a chegar-se à aproximação por Euler, conforme realizado tem-se:

$$\left(K + \frac{N}{\Delta t} \right) A(t + \Delta t) - \mathbf{P}\mathbf{U}_t = \frac{N\mathbf{A}(t)}{\Delta t} + \mathbf{J}(t + \Delta t) + \mathbf{T} \quad (3.102)$$

utilizando a aproximação seguinte em (3.99)

$$\dot{A} \approx \frac{A(t + \Delta t) - A(t)}{\Delta t} \quad (3.103)$$

Então (3.99) :

$$\frac{Q}{\Delta t} A(t + \Delta t) - U_t + RI_t = \frac{QA(t)}{\Delta t} \quad (3.104)$$

Para se discretizar a equação (3.100) no tempo, utiliza-se o algoritmo θ (BASTOS; SADOWSKI, 2003), conforme descrito a seguir:

Considerando o instante t em (3.100) tem-se:

$$U_t(t) + \left(R_{ext} + L_{ext} \frac{d}{dt} \right) I_t(t) = E_f(t) \quad (3.105)$$

e para $t + \Delta t$

$$U_t(t + \Delta t) + \left(R_{ext} + L_{ext} \frac{d}{dt} \right) I_t(t + \Delta t) = E_f(t + \Delta t) \quad (3.106)$$

Multiplicando (3.105) por $(1 - \theta)$ e (3.106) por θ

$$(1 - \theta)U_t(t) + (1 - \theta) \left(R_{ext} + L_{ext} \frac{d}{dt} \right) I_t(t) = (1 - \theta)E_f(t) \quad (3.107)$$

$$\theta U_t(t + \Delta t) + \theta \left(R_{ext} + L_{ext} \frac{d}{dt} \right) I_t(t + \Delta t) = \theta E_f(t + \Delta t) \quad (3.108)$$

Somando (3.107) com (3.108)

$$\begin{aligned} (1 - \theta)U_t(t) + \theta U_t(t + \Delta t) + (1 - \theta) \left(R_{ext} + L_{ext} \frac{d}{dt} \right) I_t(t) + \\ \theta \left(R_{ext} + L_{ext} \frac{d}{dt} \right) I_t(t + \Delta t) = (1 - \theta)E_f(t) + \theta E_f(t + \Delta t) \end{aligned} \quad (3.109)$$

$$[(1 - \theta)U_t(t) + \theta U_t(t + \Delta t)] + R_{ext}[(1 - \theta)I_t(t) + \theta I_t(t + \Delta t)] + L_{ext}[(1 - \theta) \frac{d}{dt} I_t(t) + \theta \frac{d}{dt} I_t(t + \Delta t)] = E_f(t)(1 - \theta) + \theta E_f(t + \Delta t) \quad (3.110)$$

$$+ \theta \frac{d}{dt} I_t(t + \Delta t)] = E_f(t)(1 - \theta) + \theta E_f(t + \Delta t)$$

Utilizando:

$$(1 - \theta) \frac{d}{dt} I_t(t) + \theta \frac{d}{dt} I_t(t + \Delta t) = \frac{I_t(t + \Delta t) - I_t(t)}{\Delta t}$$

A (3.110) pode ser escrita como:

$$(1 - \theta)U_t(t) + \theta U_t(t + \Delta t) + (1 - \theta)R_{ext}I_t(t) + \theta R_{ext}I_t(t + \Delta t) + \quad (3.111)$$

$$L_{ext} \frac{I_t(t + \Delta t) - I_t(t)}{\Delta t} = (1 - \theta)E_f(t) + \theta E_f(t + \Delta t)$$

Redistribuindo a (3.111), colocando os termos dependentes de $(t + \Delta t)$ à esquerda e passando para à direita os termos dependentes de (t) :

$$\theta U_t(t + \Delta t) + \theta R_{ext}I_t(t + \Delta t) + L_{ext} \frac{I_t(t + \Delta t)}{\Delta t} = (1 - \theta)U_t(t) + \quad (3.112)$$

$$(1 - \theta)R_{ext}I_t(t) + L_{ext} \frac{I_t(t)}{\Delta t} + (1 - \theta)E_f(t) + \theta E_f(t + \Delta t)$$

Para $\theta = 1$ chega-se à aproximação de Euler (BASTOS; SADOWSKI, 2003)

$$U_t(t + \Delta t) + R_{ext}I_t(t + \Delta t) + L_{ext} \frac{I_t(t + \Delta t)}{\Delta t} = L_{ext} \frac{I_t(t)}{\Delta t} + E_f(t + \Delta t) \quad (3.113)$$

O sistema final de equações será dado por:

$$\begin{bmatrix} K + \frac{N}{\Delta t} & -P & 0 \\ \frac{Q}{\Delta t} & -1 & R \\ 0 & 1 & R_{ext} + \frac{L_{ext}}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(t + \Delta t) \\ U_t(t + \Delta t) \\ I_t(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{NA(t)}{\Delta t} + J(t + \Delta t) + T \\ \frac{QA(t)}{\Delta t} \\ E_f(t + \Delta t) + \frac{L_{ext}}{\Delta t} I_t(t) \end{bmatrix} \quad (3.114)$$

3.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram desenvolvidas as equações diferenciais e integrais de modo a permitir a implementação de métodos numéricos para a solução do problema do cálculo da intensidade do campo magnético e induções geradas por linhas de transmissão em proximidade à objetos metálicos. Destaca-se entre as técnicas diferenciais sem malha, o EFGM.

4 | Resultados

Inicialmente, foi utilizado um circuito simples composto por um fio condutor percorrido por uma corrente ao lado de uma espira em série com um resistor, um condutor maciço e uma indutância. Neste primeiro circuito foram avaliadas a força eletromotriz induzida além das correntes e tensões no condutor da espira, bem como o campo magnético. Valores analíticos foram utilizados para validação.

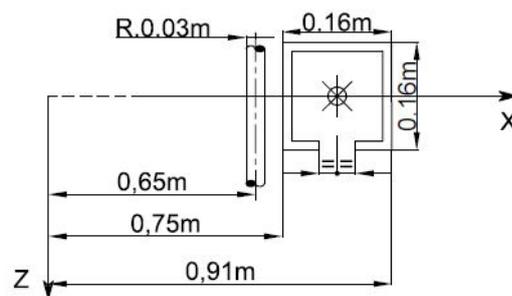


Figura 4.1 – Condutor simples e espira - planta

Posteriormente foi simulada uma Linha de Transmissão baseada em dados reais, onde foi posicionado um duto abaixo fechando circuito em um formato de uma espira quadrada. No caso da LT, primeiramente foi ligada uma fase para facilitar a validação dos resultados, e posteriormente foram ligadas as três fases.

Foram modelados algoritmos em Matlab, baseados nas metodologias apresentadas nos capítulos anteriores. Para análise e comparações devemos definir as características das Linhas de Transmissão, tais como: valores de tensão, corrente máxima e características dos condutores.

Para análise dos campos magnéticos dependemos de parâmetros, tais como: condições de contorno, tratamento de domínio aberto, truncamento de fronteira, indução de corrente, para que possamos avaliá-los.

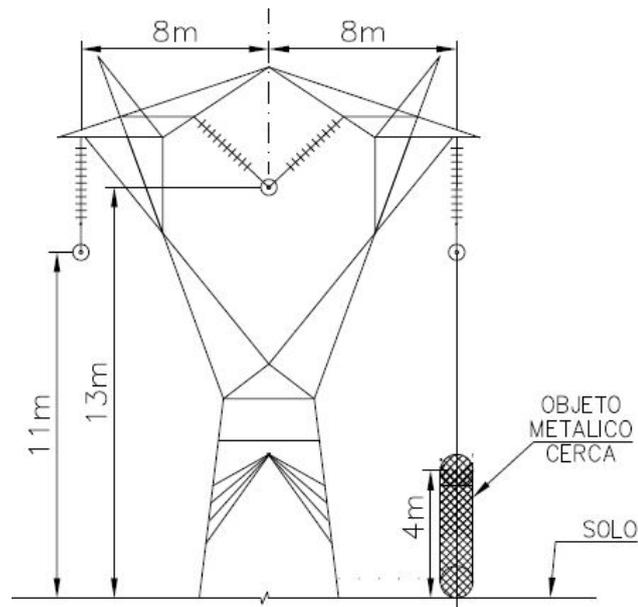


Figura 4.2 – Linha de Transmissão e objeto metálico/Cerca

4.1 Parâmetros do Problema

4.1.1 Condições de Contorno

As condições de contorno de Neumann (condições naturais) são diretamente consideradas pelo método de resíduos ponderados. Cabe assim, apenas considerar as condições de contorno de Dirichlet (condições essenciais), dadas nos contornos em que o valor dos potenciais dos nós existentes seja conhecido. (FARAH, 2014)

Para o computo de campos magnéticos ao entorno de linhas de transmissão, o domínio é delimitado através da inserção de fronteiras fictícias.

4.1.1.1 Tratamento do Domínio Aberto

Em problemas eletromagnéticos há domínios caracterizados pela existência de fronteiras físicas abertas, ou seja, que se estendem até o infinito. Nesta classe de problemas, uma vez que o EFGM precisa atuar sobre domínios discretos claramente delimitados, deve ser estabelecido um limite externo máximo, a certa distância finita do centro dos objetos de interesse, e o qual deve ser tratado por técnicas especiais, representando corretamente a região exterior não abrangida. Dentre algumas técnicas aplicadas, uma das mais usuais é a do truncamento. (CHEN; KONRAD, 1997)

4.1.1.2 Truncamento de Fronteira

Baseia na suposição de que em uma distância suficientemente grande de suas fontes, os valores dos potenciais ϕ ou de suas derivadas normais sejam próximas de zero (CHEN; KONRAD, 1997) Os contornos fictícios possuindo valores nulos para condições de Dirichlet ou Neumann. (FARAH, 2014).

Em (CHEN; KONRAD, 1997) é estabelecida uma regra em que a distância do limite externo deve ser no mínimo cinco vezes a distância ao centro dos objetos de interesse. No caso da LT é tomada a altura da torre até o centro como a distância entre o solo e o condutor mais afastado na torre, como mostra a Fig.4.3 (RIBEIRO, 2017)(FARAH, 2014).

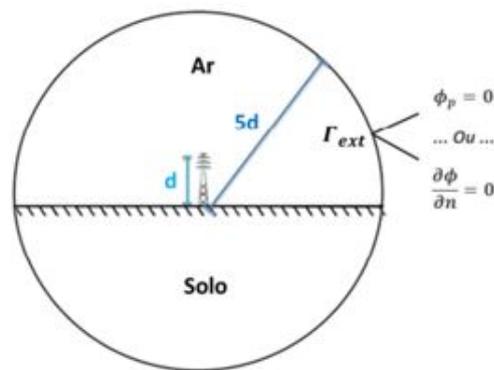


Figura 4.3 – Truncamento na Fronteira (FARAH, 2014) (RIBEIRO, 2017)

Apesar de melhorar a precisão dos resultados, o aumento ainda maior que 5 vezes a distancia do centro de interesse, representando uma fronteira infinita, deve ser avaliado com cautela uma vez que implica num custo computacional muito alto.

4.1.2 Corrente Nominal

O valor do potencial magnético para o campo magnético é estabelecido nulo nas fronteiras de Diriclet e Neumann, que delimitam o problema. Foi introduzido então os valores de densidades de correntes (J_0) dos condutores na forma fasorial polar de cada fase:

$$J_0 = \frac{|I_N| \angle \phi}{S_a} \quad (4.1)$$

onde I_N é a corrente de linha das fases A, B, C; ϕ representa o ângulo de cada fase defasadas de 120° como indicado na Figura (4.4) e S_a é área da seção transversal do condutor.

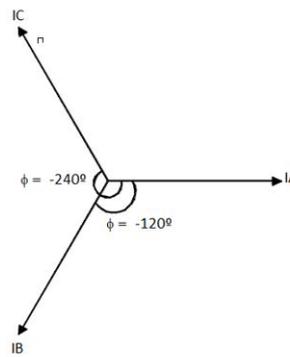


Figura 4.4 – Fases ABC de um sistema trifásico simétrico (RIBEIRO, 2017)

A corrente I_N varia com o tempo, pois às cargas conectadas à linha de transmissão sofrem variação. Logo, a corrente I_N é calculada conforme a equação (4.2) (PEREIRA, 2009).

$$I_N = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}V_N \cos(\phi)} \quad (4.2)$$

Segundo (FUCHS, 1977) para considerar condições críticas e observar atendimento às legislações vigentes, considera-se a potência máxima aparente trifásica ($S_{a\phi}$) da LT, fazendo o fator de potência igual a um ($FP = \cos\phi = 1$).

$$I_N = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}V_N} \quad (4.3)$$

Então as correntes finais:

$$\begin{aligned} I_A &= I_N < 0^\circ, \\ I_B &= I_N < -120^\circ, \\ I_C &= I_N < 120^\circ. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Para o cálculo da corrente máxima por fase devemos considerar a ampacidade de cada cabo condutor (PERRO, 2007):

$$I_{max} = nA \quad (4.5)$$

Onde:

n – número de subcondutores por fase;

A – ampacidade do cabo condutor.

Vale ressaltar que a corrente máxima calculada considerando o seu limite térmico é normalmente muito maior que a corrente de curto-circuito que pode percorrer o circuito.

4.1.3 Raio Médio Geométrico - RMG

Para múltiplos condutores, como alguns modelos de linhas de transmissão é empregado o conceito do Raio Médio Geométrico (RMG). O RMG define um novo condutor com raio equivalente ao feixe de condutores, de modo que o fluxo magnético produzido seja idêntico ao fluxo total gerado pelos subcondutores. Assume-se que as correntes distribuídas nos subcondutores sejam iguais e a altura é estabelecida do solo até o centro da circunferência do feixe (VIEIRA, 2013) (COSTA, 2009) (RIBEIRO, 2017)

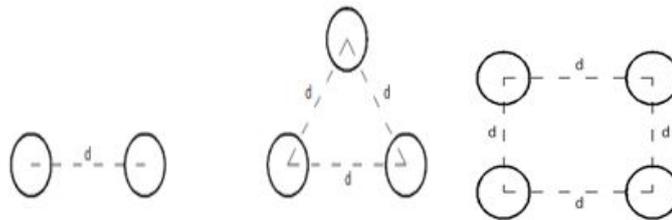
As equações para obter o RMG para cabos com dois, três e quatro condutores respectivamente como (STEVENSON, 1986):

$$RMG = \sqrt{D_s d}, \tag{4.6}$$

$$RMG = \sqrt[3]{D_s d^2}, \tag{4.7}$$

$$RMG = 1,09 \sqrt[4]{D_s d^3}, \tag{4.8}$$

Onde: D_s é o raio dos condutores individuais, fornecido por meio de tabelas. Cada tipo de cabo possui um valor de correção específico pelo efeito pelicular. A Figura 4.5 indica a disposição de cabos múltiplos.



(a) dois condutores (b) três condutores (c) quatro condutores

Figura 4.5 – Feixes de condutores (STEVENSON, 1986)

Para estabelecer o RMG da Figura 4.6 a equação 4.9 é utilizada para encontrar o RMG para múltiplos condutores simétricos (FUCHS, 1977),

$$RMG = \sqrt[n^2]{r_1 S_{12} S_{13} \dots S_{1n} r_2 S_{21} S_{23} \dots S_{2n} r_n S_{n2} S_{n3} \dots S_{n(n-1)}}, \tag{4.9}$$

Onde: r_n trata-se do raio médio geométrico do n -ésimo subcondutor, s representa a distância entre dois subcondutores, e n o número total de multicondutores que constituem o feixe (COSTA, 2009) (RIBEIRO, 2017)

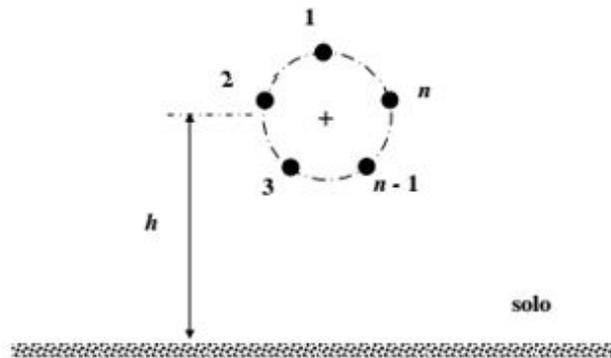


Figura 4.6 – Feixe de condutores igual ou superior a cinco (COSTA, 2009)

4.2 Características do Circuito Base

O circuito base foi idealizado com as seguintes características geométricas apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características do Circuito Base

Configurações do Circuito Base		
Corrente máxima	15 A	
Raio do condutor	0.03 m	
Posição	x(m)	y(m)
	0.65	0

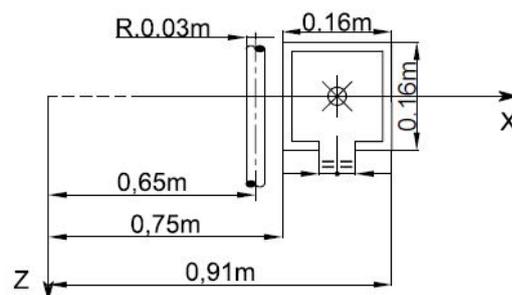


Figura 4.7 – Condutor simples e espira - planta

Foi incluída uma espira próximo a este condutor para análise dos parâmetros eletromagnéticos Tabela 4.2 .

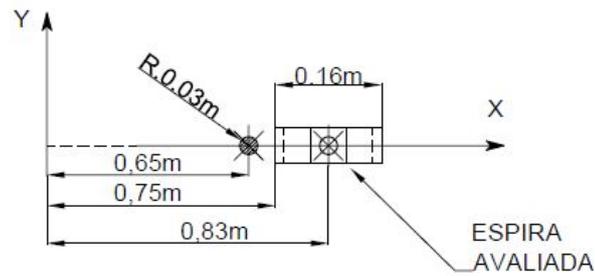


Figura 4.8 – Condutor simples e espira - corte

Tabela 4.2 – Características da Espira

Configurações Geométricas da Espira		
Dimensão	0.16 x 0.16 m	
Raio da condutor de um dos lados da espira	0.03 m	
Posição da espira	x _{ei} (m)	x _{ef} (m)
y(m)=0	0.75	0.91

4.3 Validação da Metodologia e dos valores obtidos

Os resultados obtidos pelo modelo numérico EFGM são comparados com cálculos analíticos e modelos de referência encontrados na literatura da área. A comparação dos resultados é realizada por meio do Erro Percentual Relativo definido pela equação 4.10, em que $S_{referência}$ é a solução fornecida pela referência e $S_{simulado}$ é a solução obtida pelas simulações realizadas nesse trabalho. O Erro Relativo permite a análise de um dado ponto para averiguar o erro máximo cometido.

$$Erro\ Relativo(\%) = \left(\frac{S_{referência} - S_{simulado}}{S_{referência}} \right) \cdot 100\% \quad (4.10)$$

Para validar a formulação foi analisada inicialmente o circuito base, suas características apresentadas na seção 4.2 e pela Figura 4.7 deste capítulo que apresenta a disposição do condutor/fase (linha de transmissão monofásica), bem como o objeto metálico/espira. Como o objeto de estudo foi considerado num primeiro momento apenas uma fase para foi validado o proposto nos capítulos, logo para estes casos não tivemos defasamento de corrente ou tensão. Situações 1 e 2 apresentadas abaixo.

4.3.1 Validação de resultados para o circuito base

4.3.1.1 Fio/condutor simples e uma espira

As propriedades físicas do objeto metálico ou espira são detalhados como: unicamente composto por aço, resistividade (ρ) = $1.7 \cdot 10^{-7} \Omega m$, permissividade relativa $\epsilon_r = 1$ e permeabilidade $\mu_r = 300$.

A comparação foi feita com a solução proposta pelo método EFGM e o modelo analítico, descrito a seguir.

$$\mathbf{H} = \frac{I}{2\pi r} \hat{a}\phi \quad (A/m) \quad (4.11)$$

$$\mathbf{B} = \mu H \hat{a}\phi \quad (Wb/m^2) \quad (4.12)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (Wb/m^2) \quad (4.13)$$

O fluxo magnético:

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\mu I}{2\pi r} dy dx \quad (Wb) \quad (4.14)$$

A força eletromotriz analítica será:

$$fem = -\frac{d\phi}{dt} \quad (4.15)$$

Nas simulações a seguir utilizou-se:

$$I(t) = I_m \cos(\omega t) \quad (4.16)$$

sendo $\omega = 2\pi f$, com $f=60$ Hz, $I_m = 15A$

As figuras 4.9 e 4.10 apresentam a intensidade do campo magnético e a densidade de fluxo magnético no centro da espira, os erros encontrados são indicados na Tabela 4.3, para uma melhor análise. Conforme pode ser observado, os erros encontrados são consideravelmente baixos, mostrando que a ferramenta computacional desenvolvida representa de forma confiável os perfis de campo magnéticos emitidos por uma LT.

Tabela 4.3 – Análise de erro da intensidade do campo magnético

Insidade Campo Magnético Máximo (A/m)		
Analítico	EFGM	Erro Relativo (%)
13,25637	13,29676	0,305

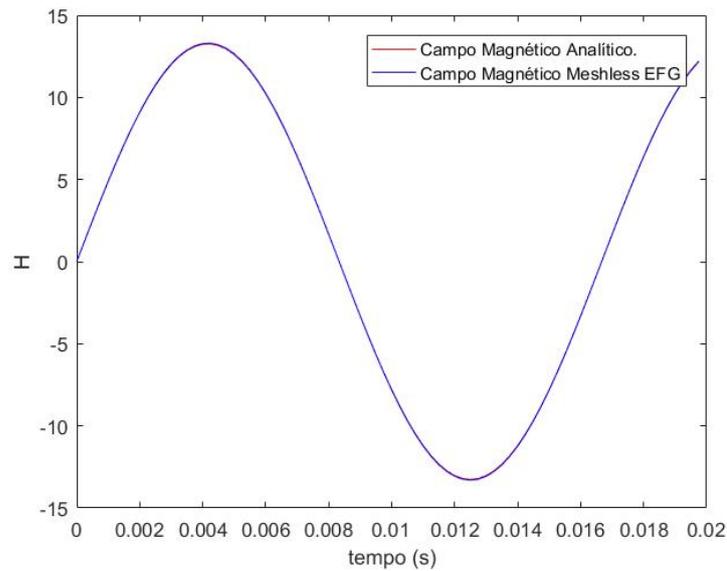


Figura 4.9 – Intensidade do Campo Magnético no centro da espira (A/m)

Analisando a Figura 4.9 e a Tabela 4.3 é observado que os resultados encontrados pelo EFGM são satisfatórios.

O valor da densidade de fluxo magnético máximo de $1,67e-05$ T, apresentados na Figura 4.10 e Tabela 4.4 foi calculado no centro da espira.

Tabela 4.4 – Análise da densidade do fluxo magnético

Densidade de Fluxo Magnético Máximo (T)	
Analítico	EFGM
$1,67e-05$	$1,67e-05$

Tabela 4.5 – Análise de erro da Força Eletromotriz

Força Eletromotriz Máxima (A/m)		
Analítico	EFGM	Erro Relativo (%)
$1,73e-04$	$1,86e-04$	7,73

Nos resultados expostos para o cômputo do campo magnético foram distribuídos 17161 nós, sendo que o valor do domínio de influência utilizando foi $d_{max}=2,5$. Foram utilizados 4 números de pontos de integração por célula.

- Observação: Para resolver as integrais da formulação indicadas no capítulo 3 são utilizados quatro pontos de Gauss por célula de integração.

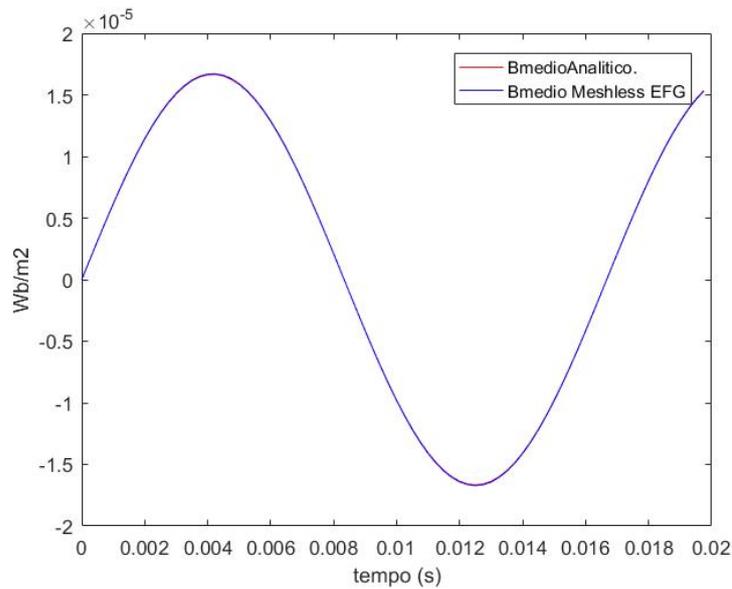


Figura 4.10 – Densidade de Fluxo Magnético

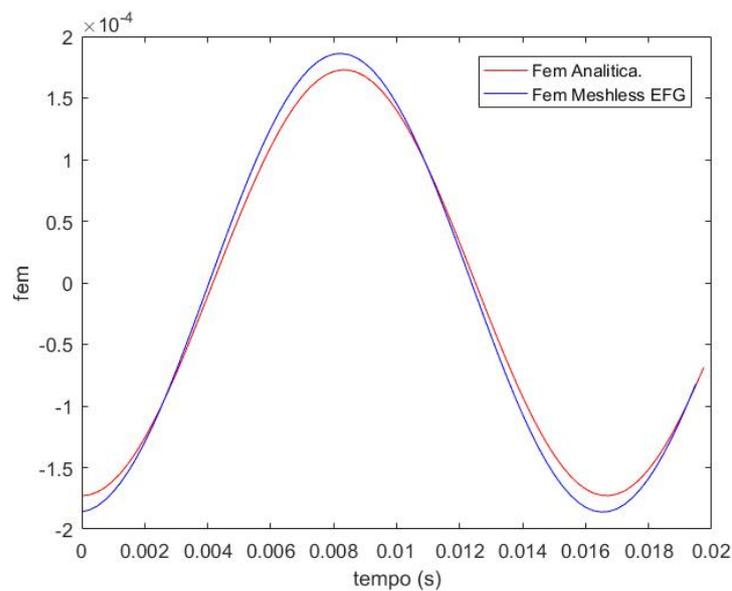


Figura 4.11 – Força Eletromotriz induzida na espira (Volts)

4.3.2 Indução de Correntes e Tensões

4.3.2.1 Fio/condutor simples e um condutor sólido com resistência e indutância

Para ilustrar o caso em estudo, a seguir a Figura 4.13 apresenta o condutor/fase e espira formada por um condutor sólido em série com um resistor e um indutor (BASTOS; SADOWSKI, 2003) e na Figura 4.14 apresenta a vista da mesma.

Neste item foram validados a intensidade do campo magnético, a densidade de fluxo magnético e força eletromotriz induzida. Foram verificados também a corrente

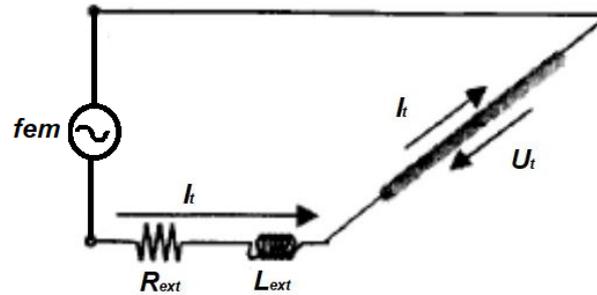


Figura 4.12 – Condutor sólido em série (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

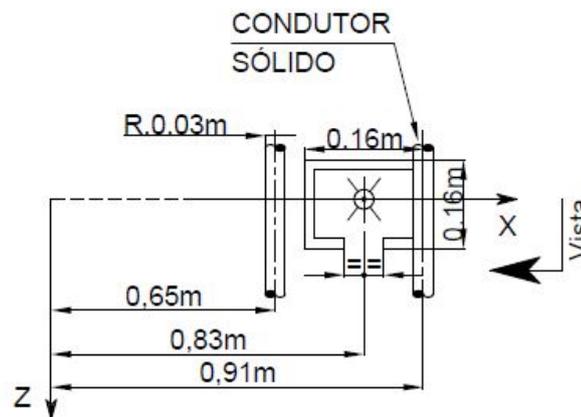


Figura 4.13 – Condutor/fase e condutor sólido - Planta

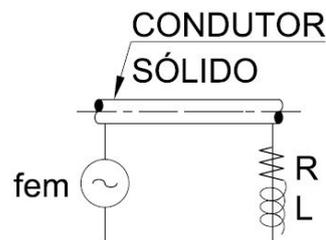


Figura 4.14 – Condutor/fase e condutor sólido - Vista

circulante e a tensão induzida em condutor sólido de cobre quando o mesmo é submetido a um campo magnético variável no tempo. Vale observar que foram utilizados um resistor de 1 kΩ e um indutor de 0,01 H.

Tabela 4.6 – Análise de erro da intensidade do campo magnético

Intensidade Campo Magnético Máximo (A/m)		
Análítico	EFGM	Erro Relativo (%)
13,25637	13,16634	0,679

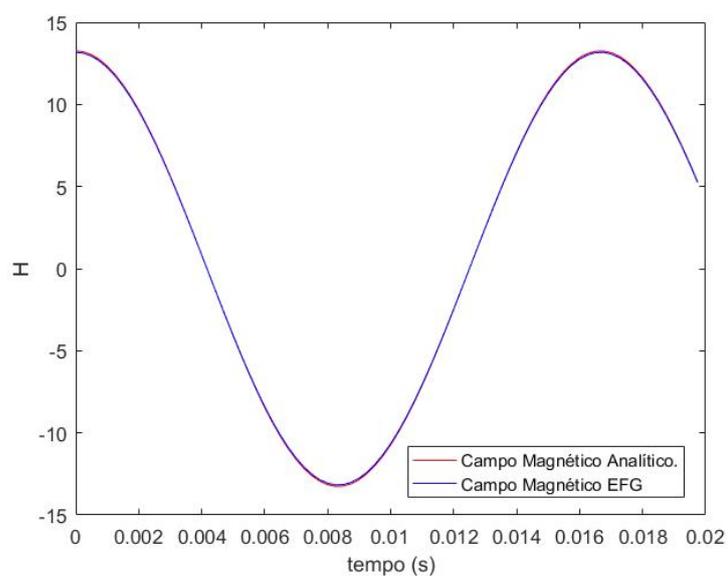


Figura 4.15 – Intensidade do Campo Magnético (A/m)

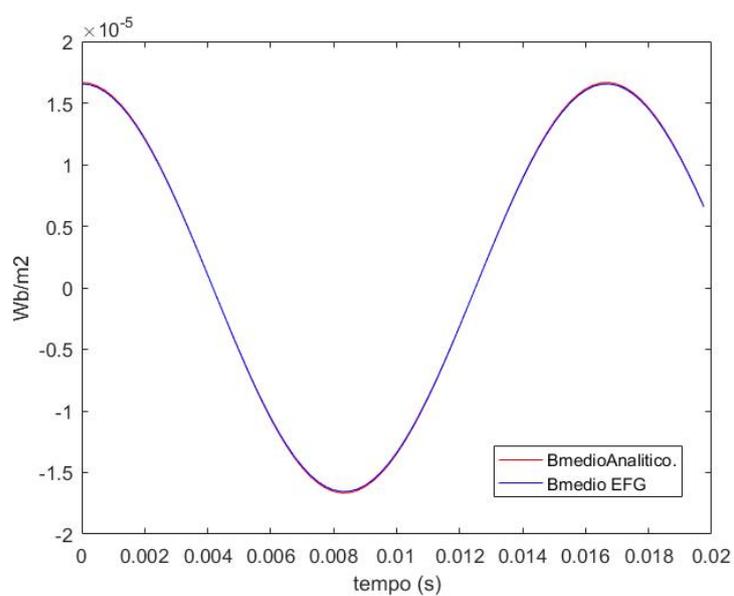


Figura 4.16 – Densidade de Fluxo Magnético

Tabela 4.7 – Análise da densidade do fluxo magnético

Densidade de Fluxo Magnético Máximo (T)	
Analítico	EFGM
1,67e-05	1,65e-05

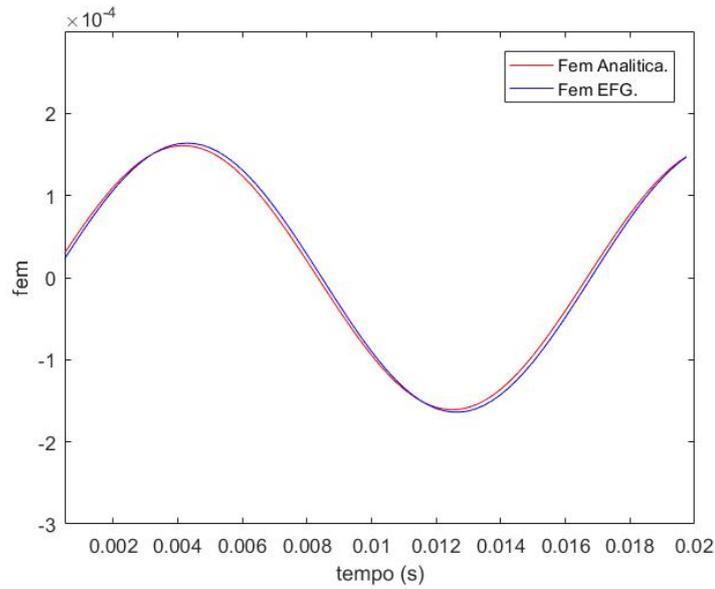


Figura 4.17 – Força Eletromotriz induzida (Volts)

Tabela 4.8 – Análise de erro da Força Eletromotriz

Força Eletromotriz Máxima (V)		
Analítico	EFGM	Erro Relativo (%)
1,61e-04	1,64e-04	1,93

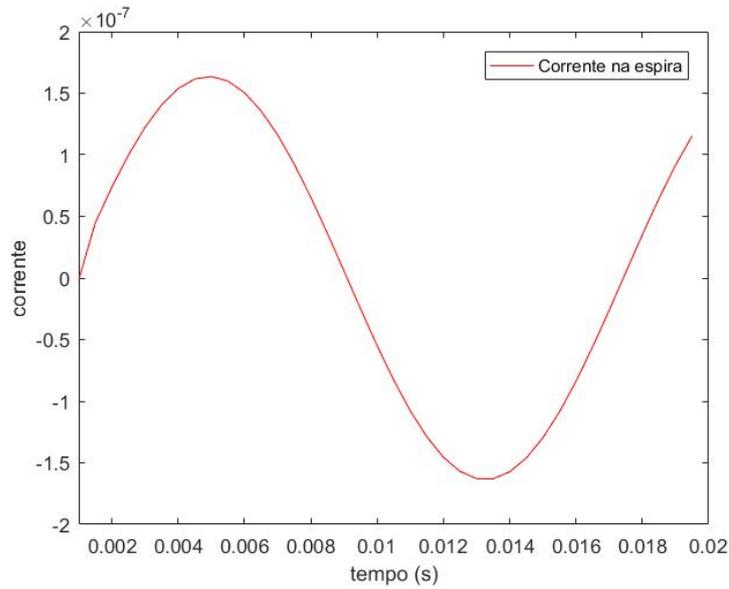


Figura 4.18 – Corrente Induzida (A)

A Figura 4.18 que apresenta a corrente induzida na espira com valor máximo de $1,6366e^{-07} A$. A Figura 4.19 que apresenta a tensão induzida no condutor sólido com valor máximo de $1,553e^{-13}V$.

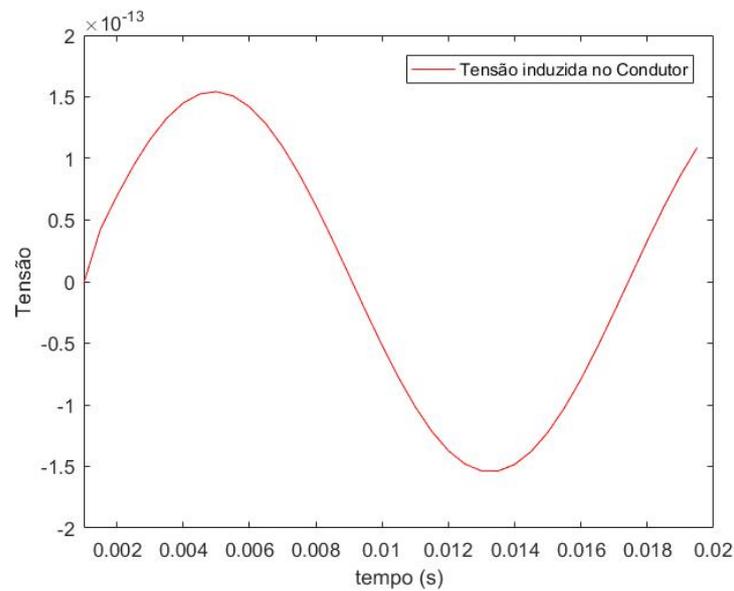


Figura 4.19 – Tensão Induzida (V)

4.4 Acoplamento Circuito-Campo em Linhas de Transmissão

4.4.1 Validação do Cálculo das Grandezas Eletromagnéticas

4.4.1.1 Apresentação da Linha de transmissão e a cerca

Neste item foi analisada a LT de Circuito Trifásico. Suas características são apresentadas na Tabela 4.9 e pela Figura 4.20 que apresenta a disposição dos condutores, bem como do objeto metálico em suas proximidades. Vale observar que considerou-se uma estrutura metálica em forma de uma espira logo abaixo uma das fases.

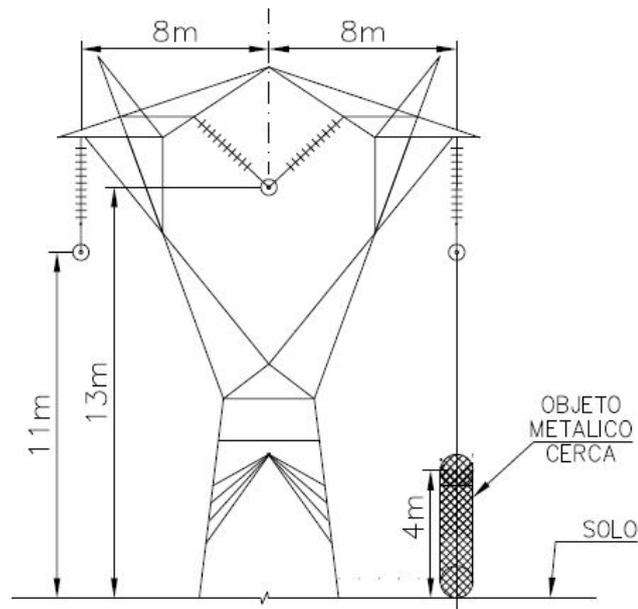


Figura 4.20 – Linha de Transmissão e objeto metálico/Cerca

Tabela 4.9 – Características da LT Trifásica

Configurações Geométricas						
Tensão de operação		525 kV				
Corrente máxima		4,68 kA				
Quantidade de fases		3				
Nº de condutores/fase		5				
Tipo/classe do condutor		CAA Grosbeak				
Diâmetro do condutor (mm)		25,16 mm				
Bitola do condutor (MCM)		636				
Ampacidade do condutor (A)		936				
Raio dos condutores (RMG)		0,43 m				
Distância entre as fases		8 m				
Comprimento da cerca		50 m				
Altura da cerca		4 m				
Raio da cerca		0,6 m				
Fases	A		B		C	
Posição	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)
	57	11	65	13	73	11
Posição	x(m)			y(m)		
Cerca	73			1		

4.4.1.2 Resultados para uma fase ligada

Neste item chegamos aos resultados para uma das três fases ligadas para facilitar as validações de campo, uma vez que o campo será ortogonal à seção da espira formada. São apresentadas também as curvas da força eletromotriz e da corrente e tensão no condutor. O campo magnético foi avaliado no meio da cerca, ou seja, a 2 metros de altura do solo. Os erros encontrados são indicados na Tabela 4.10, para uma melhor análise.

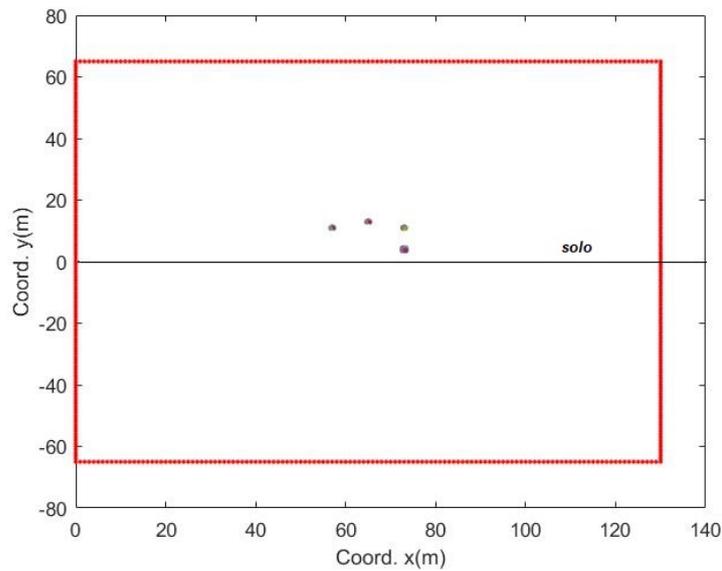


Figura 4.21 – Posição Condutores da Linha de Transmissão Trifásica com Cerca

E os erros encontrados estão dentro do esperado do ponto de vista de engenharia, mostrando que a ferramenta computacional desenvolvida representa de forma confiável os perfis de campo magnéticos emitidos por uma LT.

Tabela 4.10 – Análise de erro da intensidade do Campo magnético

Intensidade Campo Magnético Máximo		
Análítico (A/m)	EFGM (A/m)	Erro Relativo (%)
82,688	80,911	2,15

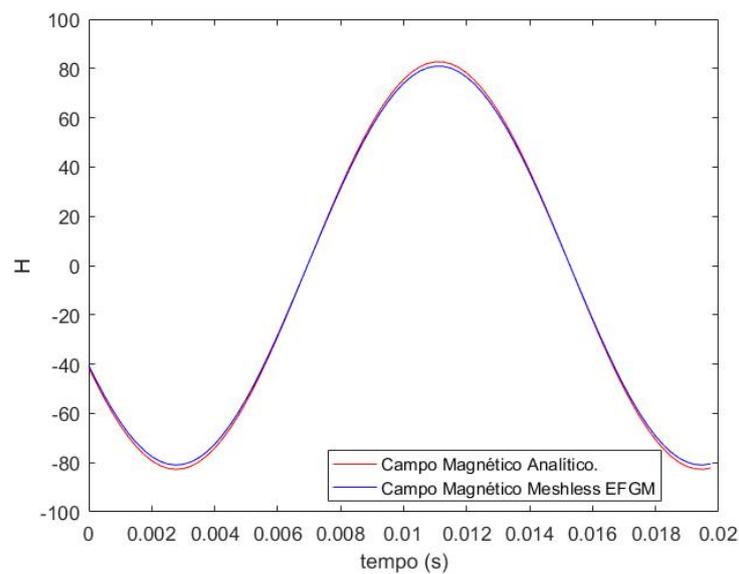


Figura 4.22 – Intensidade do Campo Magnético (A/m)

Tabela 4.11 – Análise da Densidade do fluxo magnético

Densidade do Fluxo Magnético Máximo	
Analítico (T)	EFGM (T)
$1,02 \times 10^{-4}$	$1,04 \times 10^{-4}$

O valor da densidade de fluxo magnético máximo de $1,04 \times 10^{-4}$ T, apresentados na Figura 4.23 e Tabela 4.11 encontra-se dentro do limite adotado pela Comissão Internacional para Proteção Contra Radiações Não-Ionizantes (ICNIRP, 1998) indicada na Tabela D.2 no apêndice D.

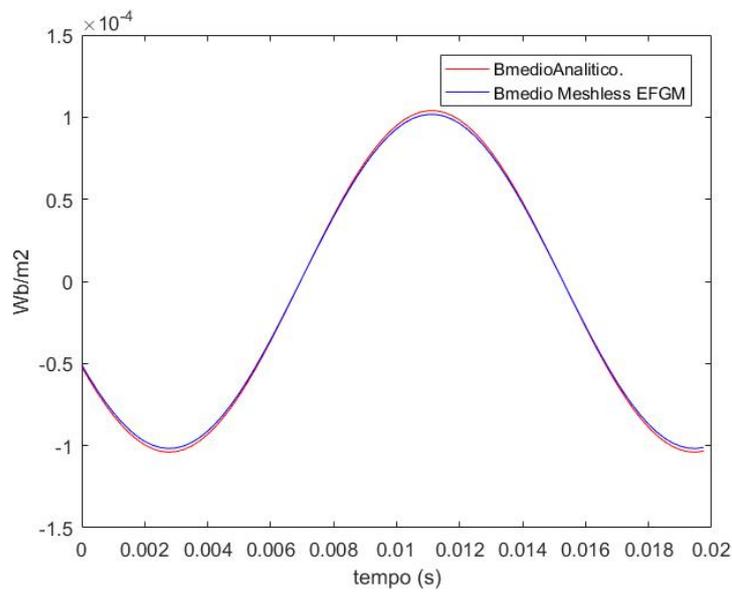


Figura 4.23 – Densidade de Fluxo Magnético

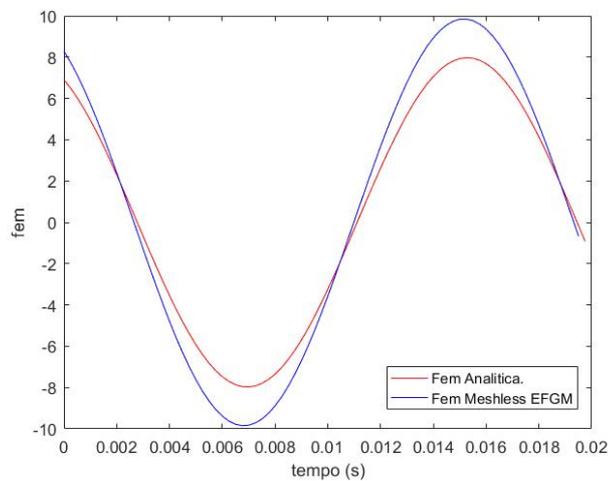


Figura 4.24 – Força Eletromotriz Induzida (V)

Tabela 4.12 – Análise de erro da Força Eletromotriz

Força Eletromotriz Máxima (V)	
Analítico	EFGM
7,97	9,84

Nos resultados expostos para o cômputo do campo magnético nas redondezas da LT são distribuídos 17161 nós, o valor do domínio de influência utilizando é $d_{max}=3$. Foram utilizados 4 números de pontos de integração por célula.

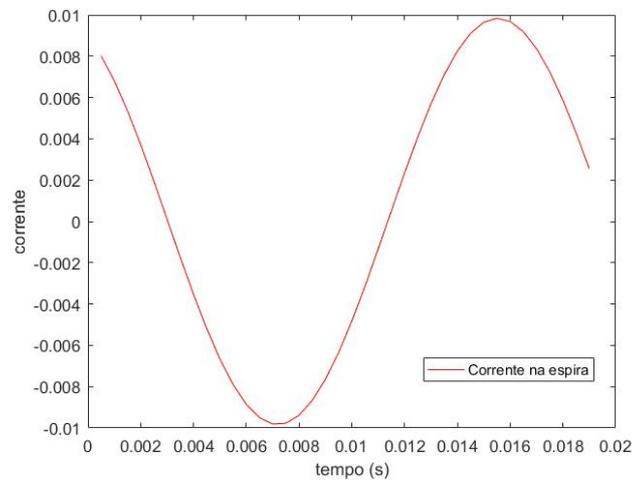


Figura 4.25 – Corrente Induzida (A)

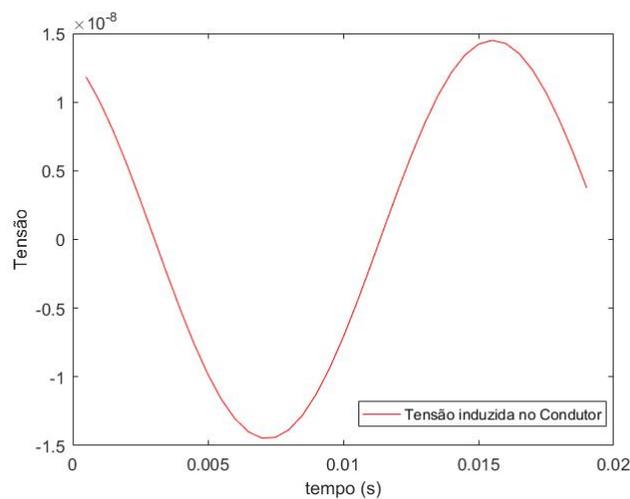


Figura 4.26 – Tensão Induzida (V)

4.4.1.3 Resultados para 3 Fases da Linha de transmissão Ligadas

Inicialmente foi simulado a LT com somente a fase próxima à cerca ligada para validarmos o EFGM com a solução analítica. A seguir foram apresentados os resultados

para as 3 fases ligadas, com um estrutura metálica, tipo uma cerca, próxima a uma das fases, formando uma espira. Serão analisados o campo magnético no centro da cerca, força eletromotriz, corrente e tensão induzida no topo da cerca. Devido a facilidade do método em deslocar nós para regiões de interesse, deslocou-se 4 nós através de uma simples translação de nós para região de interesse fases e do topo da cerca. Foram escolhidos pontos próximos às regiões de interesse (fases e topo da cerca), mas que caíram fora das mesmas, e endereçado para posições dentro das regiões de interesse, sem que fizessem sobreposição ou conexão entre os nós.

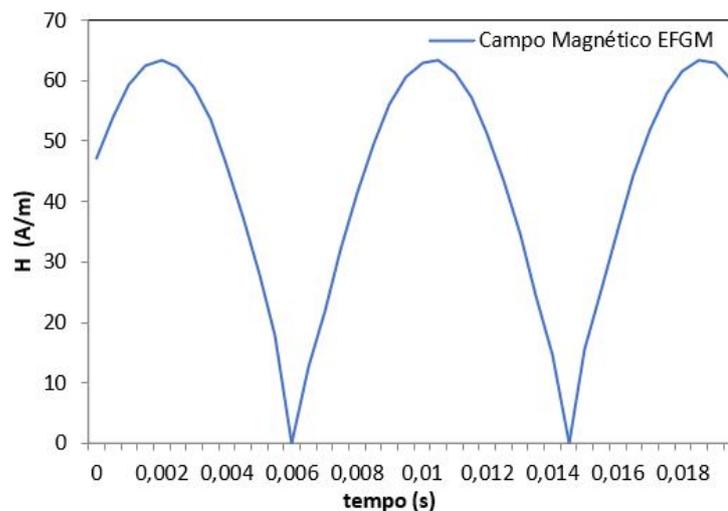


Figura 4.27 – Módulo da Intensidade do Campo Magnético no Centro da Cerca (A/m)

Tabela 4.13 – Intensidade Campo magnético

Intensidade Campo Magnético Máximo (A/m)
EFGM
63,439

Tabela 4.14 – Força Eletromotriz Induzida

Força Eletromotriz Máxima (V)
EFGM
6,802

Neste ponto serão verificadas as correntes e tensões induzidas na cerca quando a mesma é submetida a um campo magnético variável no tempo.

Tabela 4.15 – Corrente Induzida na Cerca

Corrente Máxima Induzida na Cerca (A)
EFGM
$6,802 \times 10^{-3}$

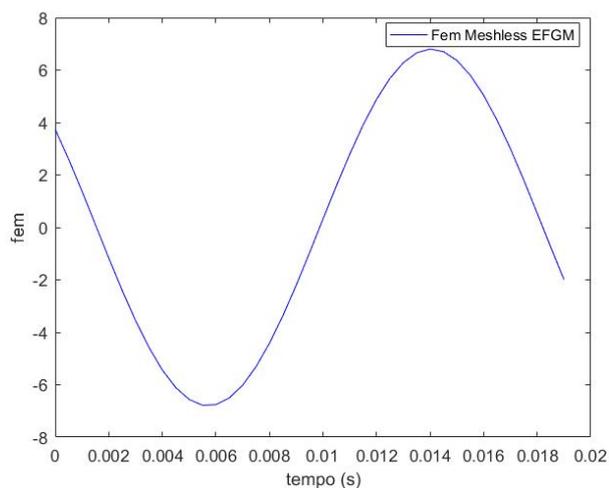


Figura 4.28 – Força Eletromotriz Induzida (V)

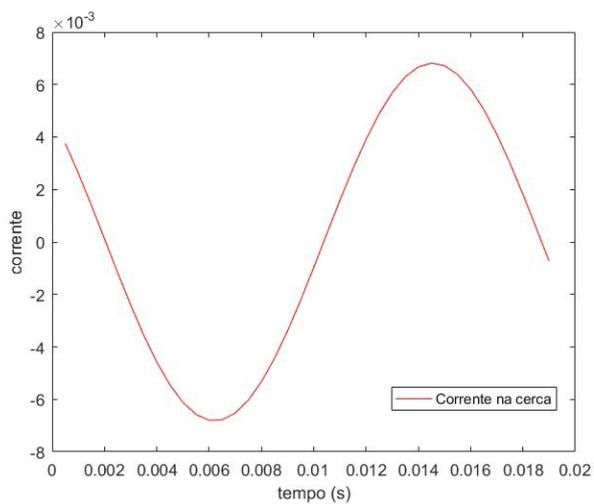


Figura 4.29 – Corrente Induzida (A)

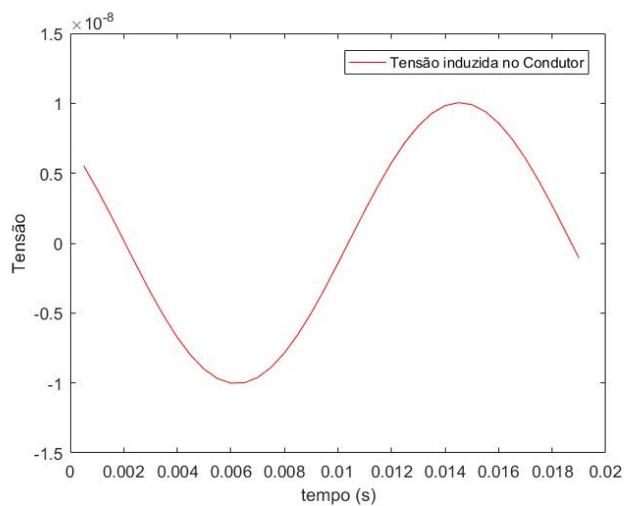


Figura 4.30 – tensão Induzida (V)

Observação: Nos resultados expostos para o cômputo do campo magnético nas redondezas da LT são distribuídos 17161 nós, o valor do domínio de influência utilizando é $d_{max}=3$. Foram utilizados 4 números de pontos de integração por célula.

4.4.1.4 Linha de transmissão com resultados preliminares para campo magnético e densidade de fluxo magnético

Para validar o cômputo do campo e fluxo magnético foi analisada a LT de Circuito Trifásico. Suas características foram apresentadas na Tabela 4.16 e pela Figura 4.31 que apresentou a disposição dos condutores.

Tabela 4.16 – Características da LT Trifásica do artigo

Configurações Geométricas						
Tensão de operação		525 kV				
Corrente máxima		4,68 kA				
Quantidade de fases		3				
Raio dos condutores (RMG)		1 m				
Distância entre as fases		6 m				
Fases	A		B		C	
Posição	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)
	74	11	80	13	86	11
Posição	x(m)			y(m)		
Cerca	88			1		

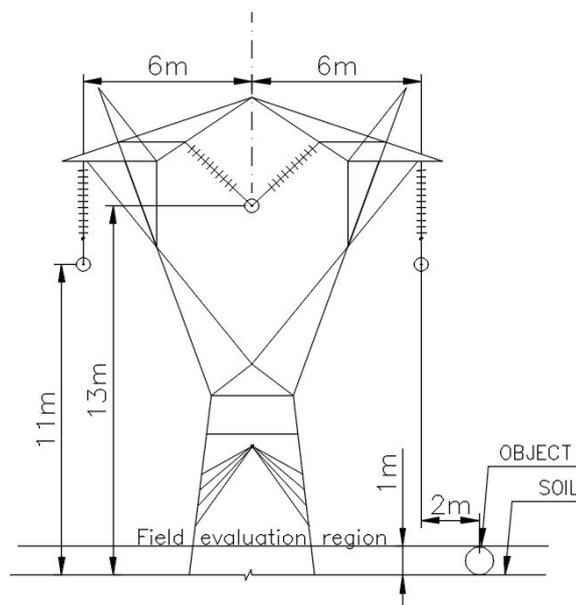


Figura 4.31 – Posição Condutores da Linha de Trasmissão Trifásica e objeto metálico

Num primeiro momento foi analisada somente a linha de transmissão e a configuração da LT considerada foi de circuito único de feixe expandido, circular e simétrico

de 5 condutores por fase com disposição em delta. Sendo que estes foram substituídos pelo raio médio geométrico (RMG), conforme vimos na seção ??, para facilitar a simulação, conforme mostra Figura 4.32.

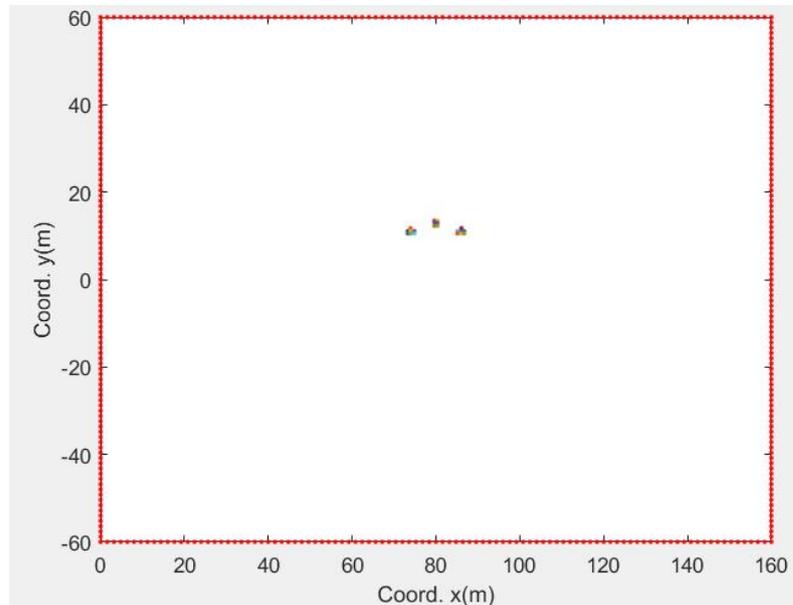


Figura 4.32 – Posição Condutores da Linha de Transmissão Trifásica

O campo magnético foi avaliado em uma região de interesse à aproximadamente um metro de altura do solo. Os erros encontrados são indicados na Tabela 4.17, para uma melhor análise. E os erros encontrados estão dentro do esperado do ponto de vista de engenharia, mostrando que a ferramenta computacional desenvolvida representa de forma confiável os perfis de campo magnéticos emitidos por uma LT.

Tabela 4.17 – Análise de erro da Intensidade do Campo magnético

Intensidade Campo Magnético Máximo (A/m)			
Analítico	EFGM	Erro Global (%)	Erro Relativo (%)
54,65	60,747	18,14	11,15

Analisando a Figura 4.33 e a Tabela 4.17 é observado que os resultados encontrados pelo EFGM são satisfatórios.

O valor da densidade de fluxo magnético máximo de $7,63e-05$ T, apresentados na Figura 4.34 e Tabela 4.18 encontra-se dentro do limite adotado pela Comissão Internacional para Proteção Contra Radiações Não-Ionizantes (ICNIRP, 1998) indicada na Tabela D.2 no apêndice D.

Tabela 4.18 – Análise do fluxo magnético

Fluxo Magnético Máximo (T)	
Analítico	EFGM
$6,87e-05$	$7,63e-05$

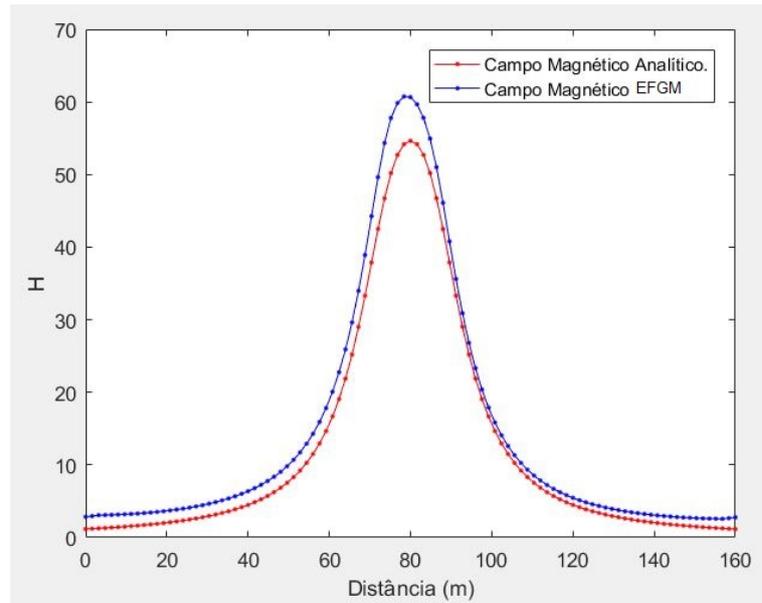


Figura 4.33 – Intensidade do Campo Magnético (A/m)

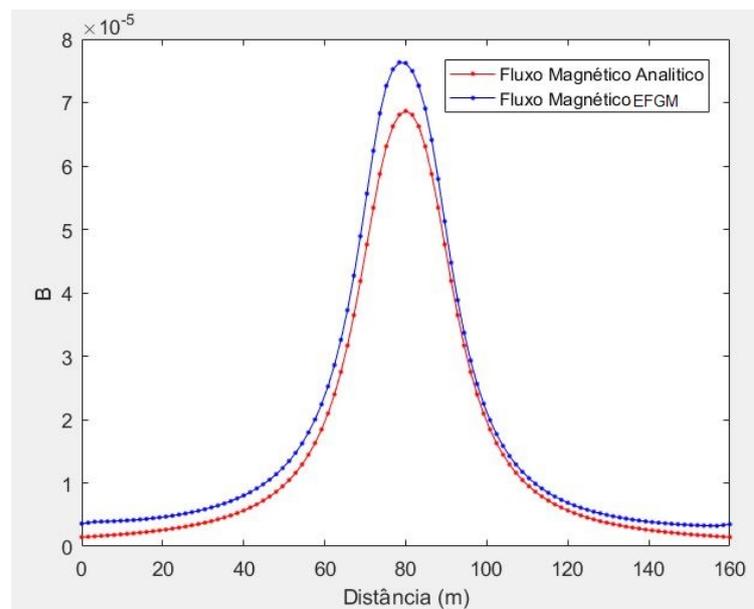


Figura 4.34 – Densidade de Fluxo Magnético

Estes resultados são os que foram submetidos para aprovação no Congresso CEFC 2020 (MONTEIRO; COPPOLI, 2020), conforme apresentado na seção 5.3. Vale ressaltar que constituem de resultados preliminares.

4.4.2 Considerações Finais

Nesse capítulo é apresentado o EFGM e sua aplicação ao problema de cálculo da intensidade de campo magnético e induções gerados por linhas de transmissão em proximidade à objetos metálicos. Os resultados obtidos são validados por meio de sua

comparação com a respectiva solução analítica. Observa-se que o EFGM é capaz de produzir uma solução precisa, tendo em vista os valores dos erros obtidos nos resultados apresentados.

O número de nós, o tamanho do domínio de influência e o número de pontos de integração impactam diretamente nos resultados obtidos pelo EFGM.

5 | Conclusão

Este trabalho procurou agregar o conteúdo teórico, de forma clara e simples, para aplicações numéricas fazendo uso do método sem malha *Element-free Galerkin Method*. Levou-se em conta demandas atuais da engenharia elétrica, mais especificamente na modelagem de campos eletromagnéticos de linhas de transmissão e sua influência nas proximidades das mesmas. Devido a simetria verificada, foi suficiente a utilização de uma geometria bidimensional para modelar o problema. Desta forma o domínio de interesse para o estudo dos campos gerados surge do corte transversal da linha de transmissão. Assim, no domínio bidimensional são apresentadas as posições dos condutores das fases e dos elementos onde são induzidos os campos, tensões e correntes. Vale observar que não se considerou eventuais distorções dos campos magnéticos devido às torres de transmissão. Não foram considerados os cabos pará-raios, pois os mesmos não afetam significativamente os campos elétrico e magnético de LTs, como observado em (RIBEIRO, 2017).

Os resultados iniciaram com um modelo elementar de acoplamento circuito-campo para título de validação da metodologia empregada. Neste modelo foram avaliados os campos magnéticos, força eletromotriz induzida, correntes e tensões em uma espira onde estavam presentes elementos passivos de circuito como resistor e indutor. Posteriormente foi modelada uma linha de transmissão. Alguns obstáculos foram superados com a utilização de funções de peso apropriadas. Com o fato do domínio do problema ser muito extenso exigiu que fosse feito deslocamento de nós para regiões de interesse, como no caso as fases e os condutores envolvidos.

Apesar da técnica ser promissora, pois não há necessidade da geração de malhas, possibilitando maior flexibilidade para tratar problemas de geometria complexas, um esforço computacional considerável foi necessário devido a não utilização de uma malha de integração otimizada e pelo fato das funções de forma serem mais complexas que a de outros métodos como o de elementos finitos. Pelo fato destes métodos se encontrarem em franco desenvolvimento, acredita-se que foi possível colaborar neste processo através das técnicas aqui apresentadas para modelagem de dispositivos eletromagnéticos presentes no sistemas elétricos de potências.

Os cálculos dos campos eletromagnéticos e suas influências nas proximidades da LT são de suma importância e gerou diversas discussões entre o governo, instituições de pesquisa e o público geral, resultando na publicação da resolução normativa nº 398 da ANEEL. Acredita-se que este trabalho poderia contribuir eventualmente com as orientações de tal norma, uma vez que este método permite avaliar se os campos eletromagnéticos estão de acordo com as normas e diretrizes nacionais.

5.1 Principais contribuições

Vale ressaltar as principais contribuições:

1- Modelagem do acoplamento circuito-campo para sistemas elétricos utilizando o EFGM. Aplicação inédita do método EFGM, utilizando IMLS para o cômputo da indução de tensões e correntes geradas por campos eletromagnéticos em estruturas próximas à Linhas de transmissão.

2- Apresentação e análise de parâmetros do EFGM para aplicações desta natureza..

3- Certificação da capacidade dos Métodos sem Malha para avaliação de campos eletromagnéticos gerados por LTs.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

Os vários campos de estudo mencionados nesta dissertação, abrem uma série de propostas para trabalhos de continuidade, algumas serão apresentadas a seguir:

- Distribuição de nós de maneira não uniforme de forma eficiente, através do pdeotool do Matlab ou do software gmesh e adaptar ao método sem malha, com mais nós nas regiões de interesse, como nas proximidades dos condutores, objeto metálico e na região de avaliação do campo a 1 metro do nível do solo. Dessa forma será possível que a região de interesse ficasse em foco, melhorando assim a precisão nos resultados, sem ter um aumento significativo nos custos computacionais, pois a região que recebe mais quantidades de nós é bem inferior a região total analisada.

- Levar em conta os efeitos do solo no cálculo.
- Comparar e testar o EFGM com outros métodos sem malha e implementar algoritmos de otimização em conjunto com o método.

- Calcular os campos magnéticos e elétricos em 3D, ao longo de todo o percurso entre as torres.

- Reavaliar a paralelização computacional do código do EFGM.

5.3 Artigo em Eventos e Congressos

MONTEIRO, GLEYDE; COPPOLI, EDUARDO. Induced voltage on metallic structures near transmission line using the element-free Galerkin method. 19TH Biennial IEEE Conference On Electromagnetic Field Computation - IEEE Transactions on Magnetics Review – CEFC 2020, April 19-22 - Pisa, Italy (artigo aceito para apresentação).

Referências

AL-GAHTANI, B. J. **Eletromagnetic Interference Caused by a High Voltage Transmission Network on Buried Pipelines Communication Cables**. Dissertação (Mestrado) — Dhahran,: Arabia Saudita: King Fahd University of Petroleum Minerals, 2009. Citado 4 vezes nas páginas viii, 9, 25 e 26.

ANEEL.398. **Resolução normativa número 398, de 23 de março de 2010**. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010398.pdf>>. Acesso em: 06 de agosto de 2019. Citado na página 3.

ANEEL.413. **Resolução normativa número 413, de 03 de novembro de 2010**. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010413.pdf>>. Acesso em: 15 de outubro de 2019. Citado na página 3.

ATLURI, S. N.; ZHU, T. A new meshless local petrov-galerkin (mlpg) approach in computational mechanics. **Computational Mechanics**, v. 22., p. 117–127, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 8.

BABUSKA, J.; MELENK, J. M. The partition of unity method. **Technical Report TX 78712**, The University of Texas at Austin., 1996. Citado na página 7.

BALANIS, C. A. **Advanced engineering electromagnetics**. 2nd. ed. Arizona: John Wiley & Sons, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 79.

BARAÚNA, D. M. **Análise da influência de linhas transmissão aéreas em regime permanente em tubulações metálicas enterradas**. Dissertação (Mestrado) — UFRJ, Rio de Janeiro, 2007. Citado na página 9.

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. New York, N. Y.: Marcel Dekker Inc., 2003. Citado 8 vezes nas páginas viii, 30, 34, 41, 42, 43, 53 e 54.

BECKER, W. D. **Estudo de Técnicas para a Redução de Campos Gerados por Linhas de Transmissão de Potência**. Dissertação (Mestrado) — UFSC, 2008. Citado na página 9.

BELYTSCHKO, T.; GU, L. A new implementation of finite element-free galerkin methods. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Technological Institute, Northwestern University, Evanston, USA, v. 113, p. 397–414, 1993. Citado na página 7.

BELYTSCHKO, T.; LU, Y. Y.; GU, L. Element-free galerkin methods. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Technological Institute, Northwestern

University, Evanston, USA, v. 37, p. 229–256, 1994. Citado 4 vezes nas páginas 6, 7, 15 e 21.

BELYTSCHKO T., Y. K. D. O. M. F.; KRYSL, P. A meshless methods: An overview and recent developments. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, n. 139, p. 3–47, 1996. Citado na página 6.

BERNARD, P. A deterministic vortex sheet method for boundary layer flow. **Maryland**, s.n., p. 132–145, 1995. Citado na página 6.

BOTTAUSCIO, O.; CHIAMPI, M.; MANZIN, A. Eddy current problems in nonlinear media by the element-free galerkin method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 34, p. 823–825, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 23.

CARTENSEN, E. L. Magnetic fields and cancer. **IEEE Engineering in Medicine and Biology**, S.I., 1995. Citado na página 3.

CASACA, J. F. G. **Cálculo do campo electromagnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia**. 80 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lisboa, 2007. Citado na página 8.

CHEN, Q.; KONRAD, A. A review of finite element open boundary techniques for static and quasi-static electromagnetic field problems. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 33, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

CHORIN, A. Numerical study of slightly viscous flow. *J. of fluid mechanics*. **Berkeley**, s.n., p. 785–796, 1973. Citado na página 6.

CINGOSKI, V.; MIYAMOTO, N.; H., Y. Element-free galerkin method for electromagnetic field computations. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 34, p. 3236–3239, 1998. Citado na página 13.

CINGOSKI, V.; MIYAMOTO, N.; H., Y. Hybrid element-free galerkin - finite element method for electromagnetic field computations. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 36, p. 1543–1547, 2000. Citado na página 13.

COPPOLI, E. H. **Modelagem de Dispositivos Eletromagnéticos Através de Métodos Sem Malhas**. Tese (Doutorado) — Laboratório Nacional de Computação Científica - LNCC, Petrópolis, 2010. Citado 14 vezes nas páginas viii, 5, 9, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 28, 29, 32, 35 e 37.

COPPOLI, E. H.; ALÍPIO, R.; RIBEIRO, G.; RESENDE, U.; AFONSO, M. The element-free galerkin method for transmission line field computation. **IX European Conference on Numerical Methods in Eletromagnetics - NUMELEC 2017**, 2017. Citado na página 13.

CORDES, L. W.; MORAN, B. Treatment of material discontinuity in the element free galerkin method. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Evanston, v. 139, p. 75–89, 1996. Citado na página 7.

COSTA, E. C. M. D. **Modelo para Condutores Múltiplos Considerando a Distribuição da Corrente nos Subcondutores**. Dissertação (Mestrado) — UNESP, Ilha Solteira, 2009. Citado 3 vezes nas páginas viii, 48 e 49.

- DOLBOW, J.; BELYTSCHKO, T. An introduction to programming the meshless element free galerkin method. **Archives of Computational Methods in Engineering**, Technological Institute, Northwestern University, Evanston, USA, v. 5; 3, p. 207–241, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 18.
- FARAH, A. A. M. **Cálculo de campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão pelo método dos elementos finitos**. 225 p. Dissertação (Mestrado) — CEFET-MG, Belo Horizonte, 2014. Citado 12 vezes nas páginas viii, 4, 9, 10, 11, 24, 25, 27, 28, 29, 45 e 46.
- FELLOW, P. S. M.; TURGEON, A.; GOULET, D. L. Study of population exposure to magnetic fields due to secondary utilization of transmission line corridors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, 1995. Citado na página 7.
- FRASER, R. A.; JONES, W. P.; W., S. S. Approximations to functions and to the solutions of differential equations. **ISBN.**, s.n., p. 1799, 1934. Citado na página 6.
- FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica - linhas aéreas**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1977. Citado 4 vezes nas páginas 3, 24, 47 e 48.
- GINGOLD, R.; MONAGHAN, J. Smooth particle hydrodynamics: theory and applications to non spherical stars. **Cambridge**, v. 181, p. 375–379, 1977. Citado na página 6.
- GIRAULT, V. Theory of a gdm on irregular networks. **S. I.**, s.n., p. 260–262, 1974. Citado na página 6.
- GUIMARÃES, G. E. **Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV**. 86 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.
- HAMEYER, K.; MERTENS, R.; BELMANS, R. Numerical methods to evaluate the electromagnetic fields below overhead transmission lines and their measurement. **IEEE International Conference on Devices, Circuits and Systems**, Caracas, p. 32–36, 1995. Citado na página 9.
- HAMEYER, K.; MERTENS, R.; BELMANS, R. Computation and measurement of electromagnetic fields of ac-high-voltage transmission lines. **Sixth International Conference on AC and DC Power Transmission**, S.I., p. 52–57, 1996. Citado na página 9.
- HAVAS, M. Biological effects of low frequency electromagnetic fields. **Electromagnetic Environments and Health in Buildings**. Spon Press, S.I., p. 535, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 hz to 100 khz). **Health physics**, v. 74, p. 494–522, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 3, 60 e 65.
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 hz to 100 khz). **Health physics**, LWW, v. 99, n. 6, p. 818–836, 2010. Citado na página 3.
- IEC.61786. Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings - special requirements for instruments and guidance for measurement. **IEC**, S.I., p. s.n., 1998. Citado na página 3.

IEEE-STD.644-1994. Standart procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from ac power lines. **IEEE**, v. 74, 1994. Citado na página 3.

ISMAIL, H. Effect of oil pipelines existing in an hv/tl corridor on the electric field distribution. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, p. 2466—2472, 2007. Citado na página 8.

JIN, J. **The Finite element Method in Electromagnetics**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2002. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.

KROK, J.; ORKISZ, J. A unified approach to the fe generalized variational fd method for nonlinear mechanics. **Springer-Verlag**, s.n., p. 353–362, 1989. Citado na página 6.

LANCASTER, P.; SALKAUSKAS, K. Surfaces generated by moving least squares methods. **Mathematics of Computation**, v. 37., p. 141–158, 1981. Citado na página 17.

LANCZOS, C. Trigonometric interpolation of empirical and analytical functions. **Math. Phys**, v. 17, p. 123–199, 1938. Citado na página 6.

LISZKA, T.; ORKISZ, J. Finite difference methods of arbitrary irregular meshes in non-linear problems of applied mechanics. **Poland, S. I.**, p. 123–199, 1977. Citado na página 6.

LIU, G. R. **Mesh Free Methods**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2003. Citado 7 vezes nas páginas viii, 14, 18, 20, 21, 22 e 23.

LIU, G. R.; GU, Y. T. A local radial point interpolation method (lr-pim) for free vibration analyses of 2-d solids. **S.I.**, v. 246, p. 29–46, 2001. Citado na página 7.

LIU, G. R.; GU, Y. T. **A truly meshless method based on the strong-weak form**. [S.l.: s.n.], 2002. 259–261 p. Citado na página 7.

LIU, G. R.; GU, Y. T. An introduction to meshfree methods and their programming. **S.I.**, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 14, 18 e 21.

LIU, W. K.; JUN, S.; F, Z. Y. Reproducing kernel particle methods. international journal for numerical methods in fluids. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Technological Institute, Northwestern University, Evanston, USA, S.I., p. 1081–1106, 1995. Citado na página 6.

MACEDO, A. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1988. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 79.

MAISURADZE, G. G.; THOMPSON, D. L. Interpolating moving least squares methods for fitting potential energy surfaces: Illustrative approaches and applications. **J. Phys. Chem**, v. 1, p. 7118–7124, 2003. Citado na página 18.

MARECHAL, Y.; COULOMB J. L.; MEUNIER, G. T. G. Use of diffuse element method for electromagnetic field computation. In: **In Digest of Fifth Biennial IEEE Conference**. [S.l.]: IEEE, 1992. Citado na página 13.

MARINHO, M. R. **Uma Contribuição ao Estudo do Ajuste Ótimo de Parâmetros para Cálculo de Campos Eletromagnéticos Descontínuos com o Método EFG**. Dissertação (Mestrado) — UNESP, São José do Rio Preto, 2012. Citado 2 vezes nas páginas viii e 18.

- MESQUITA, R. **Calculo de campos de campos eletromagneticos tridimensionais utilizando elementos finitos: Magnetostatica, Quase-estatica e Aquecimento Indutivo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC, Santa Catarina, Brasil, 1990. Citado na página 31.
- MONAGHAN, J. J. Smoothed particle hydrodynamics. **Monash University, Australia**, p. 543–574, 1992. Citado na página 6.
- MONAGHAN, J. J.; LATTANZIO, J. C. A refined particle method for astrophysical problems. **S. I.**, v. 149, p. 135–143, 1985. Citado na página 6.
- MONTEIRO, G. S. C.; COPPOLI, E. H. R. Induced voltage on metallic structures near transmission line using the element-free galerkin method. **19TH Biennial IEEE Conference On Electromagnetic Field Computation - IEEE Transactions on Magnetics Review – CEFC 2020**, Pisa, Italy, 2020. Citado na página 66.
- MUKHERJEE, Y. X. Boundary node method for potential problems. **S. I.**, v. 40, p. 797–815, 1997. Citado na página 7.
- NAYROLES, B.; TOUZOT, G.; P, V. Generalizing the finite element method: diffuse approximation and diffuse elements. **S. I.**, Springer-Verlag, v. 10, p. 307–318, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- NBR25415. Métodos de medição e níveis de referência para exposição de campos elétricos e magnéticos na frequência 50hz e 60hz. **NBR, S.I.**, 2016. Citado na página 3.
- NIEHS et al. Health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. **National Institute of Environmental Health Sciences, National Institutes of Health (NIEHS), North Carolina**, 1999. Citado na página 3.
- OLIVEIRA, M. L. d. F. **Estudo de aterramento em baixas frequências utilizando o metodo sem malha**. Dissertação (Mestrado) — UFSJ e CEFET-MG, 2016. Citado na página 14.
- OLSEN, R. G.; WONG, P. S. K. Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 4, p. 2046–2055, Oct 1992. ISSN 0885-8977. Citado na página 6.
- OÑATE, E.; ZIENKIEWICZ, R. L.; TAYLOR, R. L.; SACCO, C. A stabilized finite point method for analysis of fluid mechanics problems. **International Center for Numerical Methods in Engineering**, Barcelona., 1995. Citado na página 7.
- ONS. **Plano da Operação Energética 2017/2021**. 2017. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RE-3-0108-2017_PEN2017_SumarioExecutivo.pdf>. Acesso em: 11 de junho de 2018. Citado 2 vezes nas páginas viii e 4.
- PASARE, S. Calcul du champ magnetique d'une ligne electrique aerienne a haute tension. **Annals of the University of Craiova Electrical Engineering**, Craiova, v. 62, p. 24–33, 2008. Citado na página 9.
- PAVLIN, V.; PERRONE, N. Finite difference energy rechniques for arbitrary meshes applied to linear plate problems. **Maryland**, p. 647–664, 1975. Citado na página 6.

- PEREIRA, C. **Redes Elétricas no Domínio da Frequência**. Belo Horizonte: Artliber, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 47.
- PERRO, B. D. S. **Estudo de Campos Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão a Frequência Industrial**. Dissertação (Mestrado) — UFRJ, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 47.
- PORTELA, C.; SILVA, J.; ALVIM, M. Non-conventional ac solutions adequate for very long distance transmission - an alternative for the amazon transmission system. **IEC/CIGRE UHV Symposium. 2007, Beijing**, 2007. Citado 2 vezes nas páginas viii e 1.
- RAZAVIPOUR, S. S.; JAHANGIRI, M.; SADEGHIPOOR, H. Electrical field around the overhead transmission lines. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 62, p. 568–571, 2012. Citado na página 9.
- RESENDE, U. C.; Alípio, R.; Oliveira, M. L. F. Proposals for inclusion of the electrode radius in grounding systems analysis using interpolating element-free galerkin method. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 54, n. 3, p. 1–4, 2018. Citado na página 10.
- REZENDE, U. C.; COPOLLI, E. H. D. R.; AFONSO, M. M. A meshless approach using efg interpolating moving least-squares method in 2-d eletromagnetic scattering analysis. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 51, p. 1–4, 2015. Citado na página 16.
- RIBEIRO, G. C. **Uso de método sem malha para avaliação de campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão trifásicas aéreas**. 108 p. Dissertação (Mestrado) — CEFET-MG, Belo Horizonte, 2017. Citado 20 vezes nas páginas viii, 3, 7, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 28, 29, 32, 46, 47, 48 e 68.
- ROSA, R. S. K. **Desenvolvimento do Método Híbrido IEFGM-MOM aplicado à solução do espalhamento Eletromagnético em duas dimensões**. Dissertação (Mestrado) — CEFET-MG, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 20.
- SADIKU, M. **Elementos de Eletromagnetismo, vol. único**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Bookman, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 80.
- SANTOS, P. H. C. **Recapacitação não convencional de linhas aéreas de transmissão**. 260 p. Dissertação (Mestrado) — CEFET-MG, Belo Horizonte, 2017. Citado 2 vezes nas páginas viii e 3.
- SILVA, R. M. **Método numérico-analítico generalizado para estimação do campo eletromagnético de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando a teoria dos elementos finitos**. Tese (Doutorado) — UNESP, 2010. Citado 7 vezes nas páginas x, 3, 4, 5, 6, 9 e 83.
- SLATER, J. C. Eletronic energy bandas in metals. **Massachusetts Institute of Technology**, p. 794–801, 1934. Citado na página 6.
- SNELL, C.; VESEY, D. G. E. M. P. The application of a general ffdm to some boundary value problems. **S. I.**, v. 13, n. S.N., p. 547–552, 1981. Citado na página 6.
- SOARES, V.; AFONSO, M. M. Cálculo do campo mangético originado por linhas aéreas de transmissão de energia. **SIMMEC/EMMCOMP 2014. XI Simpó sio de Mecânica Computacional. II Encontro Mineiro de Modelagem Computacional**, Juiz de Fora, 2014. Citado na página 9.

- STEVENSON, W. D. J. **Elementos de Análise de sistemas de potência**. São Paulo: Editora McGraw Hill, 1986. Citado 2 vezes nas páginas viii e 48.
- THÉRY, H.; MELLO-THÉRY, N. A. de. **Atlas do Brasil**. 2016. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/confins/10797>>. Acesso em: 08 de outubro de 2019. Citado 3 vezes nas páginas viii, 2 e 3.
- VERARDI, S. L. L.; MACHADO, J. M.; CARDOSO, J. R. The element free galerkin method applied to the study of fully developed magnetohydrodynamic duct flows. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 38, p. 941–944, 2002. Citado na página 14.
- VIANA, S. **Estudo dos Métodos Sem Malhas na Resolução de Problemas Eletromagnéticos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 1998. Citado 5 vezes nas páginas 5, 7, 8, 14 e 28.
- VIANA, S. A.; MESQUITA, R. C. Moving least square reproducing kernel method for electromagnetic field computation. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 35, 1999. Citado na página 13.
- VIEIRA, H. R. **Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2013. Citado na página 48.
- WANG, J. G.; LIU, G. R. **Radial point interpolation method for elastoplastic problems**. [S.l.]: Proc. of the 1st Int. Conf. On Structural Stability and Dynamics, 2000. 703–708 p. Citado na página 7.
- WERTHEIMER, N.; LEEPER, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. **American journal of epidemiology**, Oxford University Press, v. 109, n. 3, p. 273–284, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.
- XUAN, L.; SHANKER, B.; ZENG, Z.; UDPA, L. Element-free galerkin method in pulsed eddy currents. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, v. 19, p. 463–466, 2004. Citado na página 13.
- XUAN, L.; UDPA, L. Element free galerkin method for static and quasi-static electromagnetic field computation. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, p. 12–20, 2004. Citado na página 13.

Apêndices

A | Formulações Analíticas dos Campos Eletromagnéticos

Esta seção apresenta brevemente as equações analíticas do campo magnético e elétrico, partindo das equações de Maxwell e equações fundamentais utilizadas para plotar as curvas analíticas apresentadas no Capítulo 4.

A.1 Equações de Maxwell

As quatro equações de Maxwell que fundamentam os problemas de eletromagnetismo são abordadas brevemente em sua forma diferencial e integral representadas abaixo (A.1) (A.2) (A.3) (A.4), uma vez que as equações dos campos eletromagnéticos são demonstradas a partir de duas delas e das relações constitutivas indicadas (A.5) (A.6) (A.7) (BALANIS, 2012),(MACEDO, 1988).

Lei de Faraday:

$$\nabla \times E = -j\omega B \quad (\text{A.1})$$

Lei de Ampère:

$$\nabla \times H = J + j\omega D \quad (\text{A.2})$$

Lei de Gauss do Magnetismo:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{A.3})$$

Lei de Gauss da Eletricidade:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (\text{A.4})$$

A Lei de Ampère (A.2) retrata as distribuições de campos magnéticos (H), através da densidade da corrente de condução simétrica (J) e da variação temporal da densidade de campo elétrico (D). A Lei de Gauss (A.4), estabelece que a densidade de campo elétrico (D) está relacionada com as cargas elétricas (ρ), ou seja, o fluxo total elétrico

presente em uma superfície fechada é igual a carga total encerrada nesta superfície. Já Lei de Faraday (A.1) indica a distribuição espacial de campos elétricos (E), por meio das variações temporais da densidade de fluxo magnético (B). Com a Lei de Gauss do Magnetismo (A.3), certificando-se da preservação de (B), sugerindo que as linhas de campo magnético são sempre contínuas (SADIKU, 2004).

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

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

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

B | Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

B.1 Resolução Normativa N° 398, de 23 DE Março de 2010

Regulamenta a Lei n° 11.934, 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 e distribuição de energia elétrica, na frequência de 60 Hz.

Relatório

Voto

O DIRETOR-GERAL SUBSTITUTO DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, conforme Portaria n° 1.457, de 25 de janeiro de 2010, no uso de suas atribuições regimentais, de acordo com deliberação da Diretoria, tendo em vista o disposto na Lei n° 9.427, de 26 de dezembro de 1996, com base no art. 4°, inciso XX, Anexo I, do Decreto n° 2.335, de 6 de outubro de 1997, na Lei n° 11.934, de 5 de maio de 2009, e no que consta do Processo n° 48500.004636/2009-62 e considerando que:

O art. 4° da Lei n° 11.934, de 5 de maio de 2009, estabeleceu que serão adotados os limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde - OMS para a exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos gerados por estações transmissoras de radiocomunicação, por terminais de usuário e por sistemas de energia elétrica que operam na faixa até 300 GHz;

A referida Lei atribuiu competência à ANEEL para regular e fiscalizar o atendimento aos limites de exposição a campos elétricos e magnéticos recomendados pela OMS relativos aos serviços de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

As contribuições recebidas na Audiência Pública n° 047/2009, realizadas no período de 19 de novembro de 2009 a 18 de dezembro de 2009, com seção vivo-presencial realizada no dia 16 de dezembro de 2009, foram objeto de análise desta Agência e permitiram o aperfeiçoamento deste ato regulamentar, resolve:

Art. 1º Regulamentar 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 originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, na frequência de 60 Hz.

§1º Os limites e procedimentos estabelecidos nesta Resolução referem-se à exposição do público em geral e da população ocupacional aos campos elétricos e magnéticos.

Art. 2º Para os efeitos desta Resolução serão considerados os seguintes conceitos e definições:

I – Campo Elétrico: grandeza que caracteriza a força exercida sobre cargas elétricas, na região em torno de qualquer condutor energizado de uma instalação elétrica. Nesta Resolução, o valor de campo elétrico é expresso em quilovolt por metro (kV/m).

II – Campo Magnético: grandeza que caracteriza a força exercida sobre cargas elétricas em movimento na região em torno de um condutor conduzindo uma corrente elétrica. Nesta Resolução, os efeitos do campo magnético são caracterizados pelo valor de densidade de fluxo magnético, expresso em microtesla (T).

III – Instalação de Distribuição: conjunto de subestações e linhas de distribuição, em tensão inferior a 230 kV, pertencente à concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica.

IV – Instalação de Interesse Restrito: subestação e linha de transmissão, em qualquer nível de tensão, pertencente à concessionária ou autorizada de geração de energia elétrica que conecta a usina aos sistemas de transmissão ou distribuição.

V – Instalação de Geração: conjunto de equipamentos necessários para a produção de energia elétrica, incluindo as unidades geradoras, pertencente à concessionária ou autorizada de geração de energia elétrica.

VI – Instalação de Transmissão: conjunto de subestações e linhas de transmissão, em tensão igual ou superior a 230 kV, ou àquele classificado como Demais Instalações de Transmissão – DIT, pertencentes à concessionária de transmissão de energia elétrica.

VII - Nível de Referência: são os níveis de campo elétrico e magnético variáveis no tempo, para avaliação prática e expedita da exposição humana, estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante – ICNIRP e recomendados pela OMS a partir das Restrições Básicas, considerando fatores de segurança que asseguram o atendimento destas restrições.

VIII – Plano de Adequação: corresponde ao documento a ser apresentado à ANEEL, contendo no mínimo o cronograma físico-financeiro e os estudos técnicos que demonstrem a eficácia das medidas propostas para a adequação das instalações às Restrições Básicas.

IX – Público em Geral: compreende indivíduos de todas as idades e diferentes

estados de saúde não integrantes da população ocupacional.

X – População Ocupacional: a população de adultos geralmente expostos a campos elétricos e magnéticos em condições conhecidas, em função da sua atividade ocupacional, e que são treinados para ser conscientes do risco potencial e tomar as precauções apropriadas.

XI - Relatório de Conformidade: documento elaborado e assinado por entidade competente contendo a memória de cálculo ou os resultados das medições utilizadas, com os métodos empregados, para verificar o atendimento às Restrições Básicas para exposição humana a campos elétricos e magnéticos.

XII - Restrição Básica: são os limites máximos de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variantes no tempo, baseados em efeitos reconhecidos à saúde, estabelecidos pela ICNIRP e recomendados pela Organização Mundial de Saúde - OMS de modo a garantir que essas grandezas físicas não ultrapassem os limiares mínimos de interação biofísica com tecidos vivos, de modo a não causar danos à saúde.

Art. 3º Conforme estabelecido pela ICNIRP e recomendado pela OMS, os Níveis de Referência para exposição do público em geral e da população ocupacional a campos elétricos e magnéticos na frequência de 60 Hz são apresentados no quadro a seguir.

Quadro1: Níveis de Referência para campos elétricos e magnéticos variantes no tempo na frequência de 60 Hz.

Tabela B.1 – Níveis de Referência para campos elétricos e magnéticos variantes no tempo na frequência de 60 Hz. (SILVA, 2010)

-	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μ T)
Público em Geral	4,17	83,33
População Ocupacional	8,33	416,67

Parágrafo único. As Restrições Básicas para exposição humana a campos elétricos e magnéticos na frequência de 60 Hz, recomendadas pela OMS, estão estabelecidas no Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields da ICNIRP.

Art. 4º Os campos elétrico e magnético produzidos pelas instalações de geração, de transmissão, de distribuição e de interesse restrito, em qualquer nível de tensão, devem atender às Restrições Básicas.

Parágrafo único. O atendimento aos Níveis de Referência garante o cumprimento das Restrições Básicas.

Art. 5º Os agentes de transmissão devem, até o final da fase de comissionamento

de novos empreendimentos, adicionar à documentação exigida pela ANEEL o memorial de cálculo ou o relatório das medições dos campos elétrico e magnéticos, contendo os dados relacionados no Anexo, e seguir os procedimentos estabelecidos no Art. 6º, quando aplicáveis.

§1º Caso os valores calculados ou medidos sejam superiores aos Níveis de Referência estabelecidos no art. 3º, o agente pode apresentar à ANEEL o Relatório de Conformidade.

§2º Caso o agente opte por não realizar o Relatório de Conformidade ou o seu resultado demonstre o não-atendimento às Restrições Básicas, deve ser apresentado o Plano de Adequação das instalações.

§3º A ANEEL pode exigir o Relatório de Conformidade se o Plano de Adequação indicar a necessidade de investimentos.

Art. 6º Os agentes de geração, transmissão e distribuição devem realizar os cálculos ou as medições dos campos elétricos e magnéticos referentes às suas instalações com tensão igual ou superior a 138 kV.

§1º Os cálculos a que se refere o caput devem ser baseados em metodologia consagrada e considerar as seguintes premissas:

- a) tensão nominal;
- b) temperatura máxima admissível de projeto;
- c) carregamento máximo do condutor para os regimes de operação e emergência;
- d) a distância mínima do condutor ao solo;
- e) configuração típica dos circuitos e seqüência de fases associadas; e
- f) 1,5 m de altura do nível do solo para a população em geral.

§2º Os cálculos ou as medições dos campos devem ser realizados:

I – No interior da subestação, para avaliar a exposição da população ocupacional, e no perímetro de cada subestação, de forma a verificar a exposição do público em geral a 1,5 m de altura do nível do solo, para as instalações de geração, transmissão e distribuição com tensões iguais ou superiores a 138 kV; e

II – No interior da faixa de servidão, para avaliar a exposição da população ocupacional, e no limite da faixa de servidão, de forma a verificar a exposição do público em geral a 1,5 m de altura do nível do solo, para as linhas de interesse restrito, de transmissão ou distribuição com tensões iguais ou superiores a 138 kV.

§3º As medições, quando realizadas, devem ser executadas no período de carga pesada, conforme metodologia estabelecida na NBR 15415/2006, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, com equipamentos com certificado de calibração

emitido por órgão credenciado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO.

§4º Caso haja instalação ou faixa de servidão compartilhada por mais de um agente, caberá ao proprietário da instalação com tensão mais elevada realizar os cálculos ou medições, considerando a contribuição de todos os ativos envolvidos ou, em conjunto, para instalações com mesmo nível de tensão.

Art. 7º Devem ser realizadas medições dos campos elétricos e magnéticos para as instalações já existentes e cujos valores calculados, nos termos do art. 6º, sejam iguais ou superiores aos Níveis de Referência estabelecidos no art. 3º desta Resolução.

§1º Caso os valores medidos sejam superiores aos Níveis de Referência, o agente deve:

I – apresentar o Relatório de Conformidade à ANEEL em até 90 (noventa) dias contados a partir do vencimento dos prazos estabelecidos no art. 8º, caso os resultados demonstrem o atendimento às Restrições Básicas; ou

II – apresentar o Relatório de Conformidade e o Plano de Adequação das instalações à ANEEL, em até 120 (cento e vinte) dias, contados a partir do vencimento dos prazos estabelecidos no art. 8º, caso os resultados demonstrem o não-atendimento às Restrições Básicas.

§2º Caso o agente opte por não realizar o Relatório de Conformidade, o Plano de Adequação das instalações deve ser apresentado à ANEEL em até 60 (sessenta) dias.

§3º A ANEEL pode exigir o Relatório de Conformidade se o Plano de Adequação indicar a necessidade de investimentos.

Art. 8º Os agentes de geração, transmissão e distribuição deverão encaminhar à ANEEL o memorial de cálculo dos campos elétricos e magnéticos ou relatório das medições, contendo os dados relacionados no Anexo, para suas respectivas instalações já existentes e com tensão igual ou superior a 138 kV, conforme prazos estabelecidos a seguir, contados a partir da publicação desta Resolução.

I – até 120 (cento e vinte) dias para instalações com tensão superior a 500 kV

II – até 240 (duzentos e quarenta) dias para instalações com tensão superior a 230 kV e menor ou igual a 500 kV; e

III – até 300 (trezentos) dias para instalações com tensão menor ou igual a 230 kV e maior ou igual a 138 kV.

§1º Os procedimentos para envio dos dados listados no Anexo serão disponibilizados no sítio da ANEEL na rede mundial de computadores.

§2º Adicionalmente aos dados listados no Anexo, os agentes descritos no caput

devem encaminhar à ANEEL uma correspondência assegurando que suas instalações com tensão inferior a 138 kV não emitem campos elétricos e magnéticos superiores aos Níveis de Referência, no mesmo prazo estabelecido no inciso III.

§3º Os dados enviados pelos agentes, nos termos do Anexo, serão divulgados no sítio da ANEEL na rede mundial de computadores.

Art. 9º Qualquer titular de unidade consumidora pode requisitar à distribuidora, mediante solicitação formal, a medição dos campos elétricos e magnéticos gerados por instalações de tensão igual ou superior a 2,3 kV.

§1º Caso a instalação de que trata o caput pertença a outro agente, a distribuidora deverá encaminhar a solicitação do consumidor ao respectivo proprietário em até 10 (dez) dias.

§2º A medição deverá seguir os procedimentos estabelecidos no art. 6º e ser realizada em até 30 (trinta) dias após o recebimento da solicitação pelo proprietário da instalação.

§3º O proprietário da instalação deve informar previamente ao consumidor todos os custos e prazos para realização das medições.

§4º Caso os valores medidos sejam inferiores aos Níveis de Referência estabelecidos no art.3º, o consumidor deve arcar com os custos decorrentes desse procedimento.

§5º Após a realização das medições, os resultados obtidos devem ser encaminhados ao consumidor, com cópia para a ANEEL, juntamente com os Níveis de Referência e a conclusão.

Art. 10 O descumprimento dos procedimentos estabelecidos nesta Resolução poderá implicar a imposição das penalidades previstas em regulamento específico da ANEEL.

Art. 11 Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

EDVALDO ALVES DE SANTANA

Este texto não substitui o publicado no D.O. de 29.03.2010, seção 1, p. 70, v. 147, n. 59.

B.1.1 ANEXO DA RN 398 ANEEL

RELAÇÃO DOS DADOS A SER ENCAMINHADOS À ANEEL REFERENTES ÀS MEDIÇÕES E CÁLCULOS DOS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS

1. Subestações

1.1 Para cálculo:

- a) nome da subestação;
- b) município;
- c) intensidade do campo elétrico (expresso em kV/m);
- d) intensidade do campo magnético (expresso em T);
- e) tensão de transformação;
- f) temperatura máxima admissível de projeto;
- g) corrente nominal de projeto por fase;
- h) corrente máxima admissível por fase;
- i) distância mínima dos condutores ao solo;
- j) método utilizado para calcular o campo elétrico;
- k) método utilizado para calcular o campo magnético;
- l) pontos calculados (informando a distância para o ponto geométrico da subestação);

1.2 Para medição:

Além dos dados descritos no item 1.1, devem ser informados também:

- a) data e horário da medição;
- b) corrente medida por fase;
- c) temperatura ambiente;
- d) pontos de medição (informando a distância para o ponto geométrico da subestação);
- e) equipamento utilizado;

2. Linhas de transmissão, de distribuição e de interesse restrito

2.1 Para o cálculo:

- a) nome da linha;
- b) intensidade do campo elétrico (expresso em kV/m);
- c) intensidade do campo magnético (expresso em T);
- d) tensão nominal da linha;
- e) corrente nominal de projeto por fase ;
- f) corrente máxima admissível por fase;
- g) número de fases;

- h) distância entre fases;
- i) especificação do cabo fase;
- j) especificação do cabo pára-raios;
- k) tipo de estrutura;
- l) configuração típica e seqüência de fases;
- m) número de circuitos por torre;
- n) número de condutores por fase;
- o) temperatura máxima admissível de projeto;
- p) largura da faixa de servidão;
- q) altura mínima dos condutores;
- r) extensão do vão de linha;
- s) tipo de rede (aérea ou subterrânea);
- t) subestação de origem da linha (e o nome do município);
- u) subestação de destino da linha (e o nome do município);
- v) a lista dos municípios atravessados pela linha;
- w) método utilizado para calcular o campo elétrico;
- x) método utilizado para calcular o campo magnético;
- y) pontos calculados (informando a distância para a projeção do centro geométrico da linha no solo);

2.2 Para medição

Além dos dados descritos no item 2.1, devem ser informados também:

- a) data e horário da medição;
- b) corrente medida por fase;
- c) temperatura ambiente;
- d) pontos de medição (informando a distância para a projeção do centro geométrico da linha no solo);
- e) equipamento utilizado.

C | Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

C.1 Resolução Normativa ANEEL N° 413, de 3 de Novembro de 2010

DOU 09.11.2010

Altera a redação dos artigos 6° e 8°, insere o art. 8°-A e substitui o Anexo da Resolução Normativa n° 398, de 23 de março de 2010, que regulamenta a Lei n° 11.934, 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 e distribuição de energia elétrica, na frequência de 60 Hz.

O DIRETOR-GERAL DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, conforme Portaria n° 1.457, de 25 de janeiro de 2010, no uso de suas atribuições regimentais, de acordo com deliberação da Diretoria, tendo em vista o disposto na Lei n° 9.427, de 26 de dezembro de 1996, com base no art. 4°, inciso XX, Anexo I, do Decreto n° 2.335, de 6 de outubro de 1997, na Lei n° 11.934, de 5 de maio de 2009, e no que consta do Processo n° 48500.004636/2009-62, resolve:

Art. 1° Alterar os artigos 6°, § 3° e 8° e inserir o art. 8°-A na Resolução Normativa n° 398, de 23 de março de 2010, que passam a vigorar com a seguinte redação:

"Art. 6° § 3° As medições, quando realizadas, devem ser executadas no período de carga pesada, conforme metodologia estabelecida na NBR 15415/2006, da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, com equipamentos com certificado de calibração emitido entidade competente, nacional ou internacional ou, alternativamente, aferidos por laboratório especializado ou centro de pesquisa.

Art. 8° I - até o dia 30 de dezembro de 2010, para instalações com tensão superior a 500 kV;

II - até o dia 30 de junho de 2011, para instalações com tensão superior a 230 kV

e menor ou igual a 500 kV; e

III - até o dia 29 de dezembro de 2011, para instalações com tensão menor ou igual a 230 kV e maior ou igual a 138 kV.

Art. 8º-A Os agentes de geração, transmissão e distribuição devem encaminhar à ANEEL uma correspondência assegurando que suas instalações com tensão inferior a 138 kV não emitem campos elétricos e magnéticos superiores aos Níveis de Referência, no mesmo prazo estabelecido no art. 8º, para cada nível de tensão.

Art. 2º Revogar o art. 8º, § 2º da Resolução Normativa nº 398, de 2010.

Art. 3º Substitui-se o Anexo da Resolução Normativa nº 398, de 2010, que passa a vigorar conforme o Anexo desta Resolução.

Art. 4º Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

NELSON JOSÉ HÜBNER MOREIRA

C.1.1 ANEXO DA RN 413 ANEEL

RELAÇÃO DOS DADOS A SER ENCAMINHADOS À ANEEL REFERENTES ÀS MEDIÇÕES E CÁLCULOS DOS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS.

1 -Subestações

1.1 - Para cálculo:

- a) nome da subestação;
- b) município;
- c) intensidade do campo elétrico (expresso em kV/m);
- d) intensidade do campo magnético (expresso em T);
- e) tensão de transformação;
- f) temperatura máxima admissível de projeto;
- g) distância mínima dos condutores ao solo;
- h) método utilizado para calcular o campo elétrico;
- i) método utilizado para calcular o campo magnético;
- j) pontos calculados (informando a distância para o centro geométrico da subestação).

1.2 - Para medição:

Além dos dados descritos no item 1.1, devem ser informados também:

- a) data e horário da medição;
- b) temperatura ambiente;
- c) pontos de medição (informando a distância para o centro geométrico da subestação);
- d) equipamento utilizado Linhas de transmissão, de distribuição e de interesse restrito.

2.1 Para o cálculo

- a) nome da linha;
- b) intensidade do campo elétrico (expresso em kV/m);
- c) intensidade do campo magnético (expresso em T);
- d) tensão nominal da linha;
- e) corrente nominal de projeto por fase;
- e) corrente máxima admissível por fase;
- f) número de fases;
- g) distância entre fases;
- h) especificação do cabo fase;
- i) especificação do cabo pára-raios;
- j) tipo de estrutura;
- k) configuração típica e seqüência de fases;
- l) número de circuitos por torre;
- m) número de condutores por fase;
- n) temperatura máxima admissível de projeto;
- o) largura da faixa de servidão;
- p) altura mínima dos condutores;
- q) extensão do vão de linha;
- r) tipo de rede (aérea ou subterrânea);
- s) subestação de origem da linha (e o nome do município);
- t) subestação de destino da linha (e o nome do município);
- u) a lista dos municípios atravessados pela linha;
- v) método utilizado para calcular o campo elétrico;

- w) método utilizado para calcular o campo magnético;
- x) pontos calculados (informando a distância para a projeção do centro geométrico da linha no solo);

2.2 Para medição

Além dos dados descritos no item 2.1, devem ser informados também:

- a) data e horário da medição;
- b) corrente medida por fase;
- c) temperatura ambiente;
- d) pontos de medição (informando a distância para a projeção do centro geométrico da linha no solo);
- e) equipamento utilizado;

D | ICNIRP - International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection

D.0.1 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields

GUIDELINES FOR LIMITING EMF EXPOSURE

Separate guidance is given for occupational exposures and exposure of the general public. Occupational exposure in these guidelines refers to adults exposed to time-varying electric, and magnetic fields from 1 Hz to 10 MHz at their workplaces, generally under known conditions, and as a result of performing their regular or assigned job activities. By contrast, the term general population refers to individuals of all ages and of varying health status which might increase the variability of the individual susceptibilities. In many cases, members of the public are unaware of their exposure to EMF. These considerations underlie the adoption of more stringent exposure restrictions for the public than for workers while they are occupationally exposed.

Addressing scientific uncertainty

All scientific data and their interpretation are subject to some degree of uncertainty. Examples are methodological variability and inter-individual, inter-species, and inter-strain differences. Such uncertainties in knowledge are compensated for by reduction factors.

There is, however, insufficient information on all sources of uncertainty to provide a rigorous basis for establishing reduction factors over the whole frequency range and for all modulation patterns. Therefore, the degree to which caution is applied in the interpretation of the available database and in defining reduction factors is to a large extent a matter of expert judgment.

Basic restrictions and reference levels

Limitations of exposure that are based on the physical quantity or quantities directly related to the established health effects are termed basic restrictions. In this guideline, the physical quantity used to specify the basic restrictions on exposure to EMF is the internal electric field strength E_i , as it is the electric field that affects nerve cells and other electrically sensitive cells.

The internal electric field strength is difficult to assess. Therefore, for practical exposure assessment purposes, reference levels of exposure are provided. Most reference levels are derived from relevant basic restrictions using measurement and/or computational techniques but some address perception (electric field) and adverse indirect effects of exposure to EMF. The derived quantities are electric field strength (E), magnetic field strength (H), magnetic flux density (B) and currents flowing through the limbs (IL). The quantity that addresses indirect effects is the contact current (IC). In any particular exposure situation, measured or calculated values of any of these quantities can be compared with the appropriate reference level. Compliance with the reference level will ensure compliance with the relevant basic restriction. If the measured or calculated value exceeds the reference level, it does not necessarily follow that the basic restriction will be exceeded. However, whenever a reference level is exceeded it is necessary to test compliance with the relevant basic restriction and to determine whether additional protective measures are necessary.

BASIC RESTRICTIONS

The main objective of this publication is to establish guidelines for limiting EMF exposure that will provide protection against adverse health effects. As noted above, the risks come from transient nervous system responses including peripheral (PNS) and central nerve stimulation (CNS), the induction of retinal phosphenes and possible effects on some aspects of brain function.

In view of the considerations above for frequencies in the range 10 Hz to 25 Hz, occupational exposure should be limited to fields that induce electric field strengths in CNS tissue of the head (i.e., the brain and retina) of less than 50 mV m^{-1} in order to avoid the induction of retinal phosphenes. These restrictions should also prevent any possible transient effects on brain function. These effects are not considered to be adverse health effects; however, ICNIRP recognizes that they may be disturbing in some occupational circumstances and should be avoided but no additional reduction factor is applied. Phosphene thresholds rise rapidly at higher and lower frequencies, intersecting with the thresholds for peripheral and central myelinated nerve stimulation at 400 Hz. At frequencies above 400 Hz, limits on peripheral nerve stimulation apply in all parts of the body.

Exposure in controlled environments, where workers are informed about the possible transient effects of such exposure, should be limited to fields that induce electric

fields in the head and body of less than 800 mV m^{-1} in order to avoid peripheral and central myelinated nerve stimulation. A reduction factor of 5 has been applied to a stimulation threshold of 4 V m^{-1} in order to account for the uncertainties described above. Such restrictions rise above 3 kHz.

For the general public for CNS tissue of the head a reduction factor of 5 is applied, giving a basic restriction of 10 mV m^{-1} between 10 and 25 Hz. Above and below these values, the basic restrictions rise. At 1,000 Hz it intersects with basic restrictions that protect against peripheral and central myelinated nerve stimulation. Here, the reduction factor of 10 results in a basic restriction of 400 mV m^{-1} , which should be applied to the tissues of all parts of the body.

The basic restrictions are presented in Table D.1. Time averaging ICNIRP recommends that the restrictions on internal electric fields induced by electric or magnetic fields including transient or very short-term peak fields be regarded as instantaneous values which should not be time averaged (see also section on non-sinusoidal exposure). Spatial averaging of induced electric field When restricting adverse effects of induced electric fields to nerve cells and networks, it is important to define the distance or volume over which the local induced electric field must be averaged. As a practical compromise, satisfying requirements for a sound biological basis and computational constraints, ICNIRP recommends determining the induced electric field as a vector average of the electric field in a small contiguous tissue volume of $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$. For a specific tissue, the 99th percentile value of the electric field is the relevant value to be compared with the basic restriction.

Basically the electric field effects on neurons and other electrically excitable cells are local effects, but there are electrophysiological and practical dosimetric factors that constrain the minimum volume or distance. The major physical factor disturbing the function of neurons and neuronal networks is the voltage produced by the induced electric field over the membrane of the cell. For isolated nerve fibers aligned along the direction of the electric field (maximum coupling) this voltage is integrated from the electric field over the electrotonic distance varying from 2 to 7 millimeters for invertebrate nerves (Reilly 1998; Reilly and Diamant 2003). For myelinated nerve cells a good assumption for the integration distance is approximately 2 mm, which is the maximum inter-nodal distance between the nodes of Ranvier. These distances are relevant when considering stimulation thresholds to isolated nerve cells. In the case of sub-threshold weak electric field effects, such as retinal phosphenes, the collective "network" effect of numerous interacting nerve cells must be taken into account. The threshold of the effect is considerably lower than the stimulation threshold of isolated nerve cells, which is due to summation and integration of small, induced voltages in the synapses. It has been suggested that the averaging volume for the induced electric field

should be based on minimum of 1,000 interacting cells, which is approximately 1 mm³ in most nerve tissue (Jefferys 1994). Hence, a biologically reasonable averaging distance might extend from 1 to 7 mm. From a practical point of view, it is difficult to achieve satisfactory accuracy in the millimeter resolution computation of the induced electric field, and even more difficult to measure it. Maximal values in one voxel in a specific tissue are prone to large stair-casing errors associated with sharp corners of the cubical voxel. A solution to obtain more stable peak approximations is based on choosing for the peak value a value representing the 99th percentile value of the induced field in a specific tissue. From the biological point of view however, this is a somewhat arbitrary choice because the peak value depends on the resolution. Another option for the spatial averaging is to define the local electric field as an average in a small volume or along a line segment (Reilly and Diamant 2003).

Tabela D.1 – Basic restrictions for human exposure to time-varying electric and magnetic fields.

Exposure characteristic	Frequency range	Internal electric Field (V m ⁻¹)
Occupational exposure CNS tissue of the head	1-10 Hz	0.5/f
	10 Hz - 25 Hz	0.05
	25 Hz - 400 Hz	2x10 ⁻³ f
	400 Hz - 3 kHz	0.8
	3 kHz - 10 MHz	2.7x10 ⁻⁴ f
All tissues of head and body	1 Hz -3 kHz	0.8
	3 kHz - 10 MHz	2.7x10 ⁻⁴ f
General public exposure CNS tissue of the head	1 Hz -10 kHz	0.1/f
	10 Hz - 25 Hz	0.01
	25 Hz - 1000 Hz	4x10 ⁻⁴ f
	1000 Hz - 3 kHz	0.4
	3 kHz - 10 MHz	1.35x10 ⁻⁴ f
All tissues of head and body	1 Hz -3 kHz	0.4
	3 kHz - 10 MHz	1.35x10 ⁻⁴ f

Notes: - f is the frequency in Hz.

- All values are rms.

- In the frequency range above 100 kHz, RF specific basic restrictions need to be considered additionally.

As a general rule the averaging volume should not extend beyond the boundary of the tissue except for tissues such as the retina and skin, which are too thin to cover the whole averaging cube. For the skin the same averaging volume of 2 x 2 x 2 mm³ can

be assumed, and it may extend to the subcutaneous tissue. For the retina the averaging volume may extend to the tissues in front and behind it.

REFERENCE LEVELS

The reference levels are obtained from the basic restrictions by mathematical modeling using published data (Dimbylow 2005, 2006). They are calculated for the condition of maximum coupling of the field to the exposed individual, thereby providing maximum protection. Frequency dependence and dosimetric uncertainties were taken into account. The reference levels presented consider two distinct effects and approximate a combination of the induced electric fields in the brain, relevant for CNS effects, and the induced electric fields in non-CNS tissues anywhere in the body, relevant for PNS effects (i.e., at 50 Hz, the factor used to convert the basic restriction for CNS effects to an external magnetic field exposure is 33 V m^{-1} per T, and for PNS effect 60 V m^{-1} per T. An additional reduction factor of 3 was applied to these calculated values to allow for dosimetric uncertainty).

In addition, the electric field reference level for occupational exposure up to 25 Hz includes a sufficient margin to prevent stimulation effects from contact currents under most practical conditions. Between 25 Hz and 10 MHz the reference levels are based on the basic restriction on induced electric fields only and might thus not provide a sufficient margin to prevent stimulation effects from contact currents under all possible conditions in that frequency band.

The electric field reference levels for general public exposure up to 10 MHz prevent adverse indirect effects (shocks and burns) for more than 90 % of exposed individuals. In addition, the electric field reference levels for general public exposure up to 50 Hz include a sufficient margin to prevent surface electric-charge effects such as perception in most people.

Tables D.2. and C.3 summarize the reference levels for occupational and general public exposure, respectively, and the reference levels are illustrated in Figs. 2 and 3. The reference levels assume an exposure by a uniform (homogeneous) field with respect to the spatial extension of the human body.

Spatial averaging of external electric and magnetic fields

Reference levels have been determined for the exposure conditions where the variation of the electric or magnetic field over the space occupied by the body is relatively small. In most cases, however, the distance to the source of the field is so close that the distribution of the field is non-uniform or localized to a small part of the body. In these cases the measurement of the maximum field strength in the position of space occupied by the body always results in a safe, albeit very conservative exposure assessment.

Tabela D.2 – Reference levels for occupational exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).

Frequency range	E-field strength E(kV m ⁻¹)	Magnetic field strength H (A m ⁻¹)	Magnetic flux density B (T)
1Hz - 8 Hz	20	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$0.2 / f^2$
8Hz - 25 Hz	20	$2 \times 10^4 / f^2$	$2.5 \times 10^{-2} / f$
25Hz - 300 Hz	$5 \times 10^2 / f$	8×10^2	1×10^{-3}
300Hz - 3 kHz	$5 \times 10^2 / f$	$2.4 \times 10^5 / f$	$0.3 / f$
3 kHz - 10 MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}

Notes: - f in Hz.

- See separate sections below for advice on non sinusoidal and multiple frequency exposure.

- To prevent indirect effects especially in high electric fields see chapter on “Protective measures.”

- In the frequency range above 100 kHz, RF specific reference levels need to be considered additionally.

Tabela D.3 – Reference levels for general public exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).

Frequency range	E-field strength E(kV m ⁻¹)	Magnetic field strength H (A m ⁻¹)	Magnetic flux density B (T)
1Hz - 8 Hz	5	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8Hz - 25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
25Hz - 50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50Hz - 400 Hz	$2.5 \times 10^2 / f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400 Hz - 3 kHz	$2.5 \times 10^2 / f$	$6.4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3 kHz - 10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

For a very localized source with a distance of a few centimeters from the body, the only realistic option for the exposure assessment is to determine dosimetrically the induced electric field, case by case. When the distance exceeds 20 cm, the distribution of the field becomes less localized but is still non-uniform, in which case it is possible to determine the spatial average along the body or part of it (Stuchly and Dawson 2002; Jokela 2007). The spatial average should not exceed the reference level. The local exposure may exceed the reference level but with an important provision that the basic restriction shall not be exceeded. It is the task of standardization bodies to give further guidance on the specific exposure situations where the spatial averaging can be applied.

This guidance shall be based on well established dosimetry. The standardization bodies also may derive new reference levels for special types of non-uniform exposure.

Additivity of exposure to electric and magnetic fields

Each of the external electric and magnetic field induces an electric field component, which add vectorially in the tissue. In the case of the exposure analysis based on the external electric and magnetic fields, a conservative approach would be to assume that both the electrically and magnetically induced field components attain the maximum value in the same critical point at the same phase. This would imply that the exposures to the external electric and magnetic fields are additive (Cech et al. 2008). Such situations, however, are judged to be very infrequent taking into account the great difference in the distribution of the electrically and magnetically induced electric fields.

REFERENCE LEVELS FOR CONTACT CURRENTS

Up to 10 MHz reference levels for contact current are given for which caution must be exercised to avoid shock and burn hazards. The point contact reference levels are presented in Table C.4. Since the threshold contact currents that elicit biological responses in children are approximately one-half of those for adult men, the reference levels for contact current for the general public are set lower by a factor of 2 than the values for occupational exposure. It should be noted that the reference levels are not intended to prevent perception but to avoid painful shocks. Perception of contact current is not per se hazardous but could be considered as annoyance. Prevention of excess contact currents is possible by technical means.

Tabela D.4 – Reference levels for time-varying contact currents from conductive objects.

Exposure characteristic	Frequency range	Maximum contact current (mA)
Occupational exposure	Up to 2.5 kHz	1.0
	2.5 - 100 kHz	0.4f
	100 kHz - 10 MHz	40
General public exposure	Up to 2.5 kHz	0.5
	2.5 - 100 kHz	0.2f
	100 kHz - 10 MHz	20

Note: f is the frequency in kHz.