

ÍNDICE

PREFÁCIO	xiii
AGRADECIMENTOS	xxi
1 REVISÃO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS	
DO ELETROMAGNETISMO — FUNÇÕES POTENCIAIS	1
1.1 Equações Fundamentais	3
1.2 Equações de Constituição	5
1.3 Cargas e Correntes Fictícias	8
1.4 Forma Integral das Equações de Maxwell	9
1.5 Condições de Fronteira	12
1.6 Potenciais Eletromagnéticos	14
1.6.1 Equações dos Potenciais Eletromagnéticos	14
1.6.1.1 Meios Lineares e Isotrópicos	15
1.6.1.2 Meios Dispersivos Homogêneos	16
1.6.1.3 Meios Bons Condutores	18
1.6.1.4 Campo Magnético Estacionário	19
1.6.1.5 Campo Elétrico das Correntes Estacionárias	19
1.6.1.6 Campo Elétrico Estático	19
1.7 Interpretação Energética das Equações de Maxwell	19
1.7.1 Energia do Campo Elétrico Estático	19
1.7.2 Energia do Campo Magnético Estacionário	21
1.7.3 Fluxo de Energia Eletromagnética	22
1.8 Campos Harmônicos no Tempo	23
1.8.1 Notação Complexa de Grandezas Vetoriais	23

1.8.2	Equações de Maxwell no Domínio da Frequência	25
1.8.3	Equações para os Potenciais	26
1.8.3.1	Propagação Guiada em Guias de Onda Axiais	26
1.8.3.2	Campo Eletromagnético em Meios Bons Condutores	27
Apêndice 1.1	— Vetor de Hertz	28
Apêndice 1.2	— Descrição da Taxa de Variação em Ordem ao Tempo da Energia Eletromagnética	29
2	FORMULAÇÃO DIFERENCIAL, INTEGRAL E VARIACIONAL	
	DO CAMPO	31
2.1	Equações Diferenciais às Derivadas Parciais	33
2.2	Unicidade de Solução	37
2.2.1	Equações Hiperbólicas	37
2.2.2	Equações Elípticas	40
2.2.3	Equações Parabólicas	41
2.3	Equações Elípticas do Campo Eletromagnético	42
2.3.1	Formulação Diferencial	42
2.3.2	Formulação Integral	45
2.3.3	Formulação Variacional	52
2.4	Equações Hiperbólicas do Campo Eletromagnético	56
Apêndice 2.1	— Derivadas de Ordem Superior da Função ϕ que Satisfaz (2.9)	58
Apêndice 2.2	— Equação do Potencial Vetor para Problemas 2D do Campo Magnético	58
Apêndice 2.3	— Equação do Potencial para Problemas 2D em Meios Dispersivos com Fenômenos Harmônicos no Tempo	59
Apêndice 2.4	— Formulação Variacional de Hamilton	59
Apêndice 2.5	— Formulação Integral e Variacional das Equações Hiperbólicas	60
3	MÉTODOS ANALÍTICOS — APLICAÇÃO À EQUAÇÃO DE LAPLACE	63
3.1	Potencial Complexo — Transformação Conforme	65
3.2	Método de Separação de Variáveis	73
3.2.1	Problemas 2D em Coordenadas Cartesianas	73
3.2.2	Problemas 2D em Coordenadas Polares	74
3.2.2.1	Aplicação a Cabos com Bainha	76
3.2.3	Problemas 3D em Coordenadas Esféricas	84

Apêndice 3.1 — Campo Elétrico de Duas Cargas Filiformes	86
Apêndice 3.2 — Contribuição para a Solução com Singularidades no Eixo de um Condutor de Fase (3.44) mas Centrada no Eixo da Bainha	87
4 MÉTODOS NUMÉRICOS — APROXIMAÇÃO DOS CAMPOS	89
4.1 Campo Aproximado	92
4.2 Funções de Base de Interpolação	94
4.3 Equações Aproximadas	96
4.4 Método dos Momentos	97
4.4.1 Método dos Resíduos Pesados	99
4.4.2 Método de Galerkin	101
4.4.3 Método de Adaptação Pontual	102
4.4.4 Técnica do Erro Quadrático Mínimo	103
4.4.5 Método Variacional	103
4.4.6 Aplicação do Método dos Momentos	105
4.5 Método das Diferenças Finitas	109
4.5.1 Problemas 1D	109
4.5.1.1 Aproximações dos Operadores Diferenciais	110
4.5.1.2 Solução da equação de Poisson	111
4.5.1.3 Barreira de Potencial de uma Junção p - n	112
4.5.2 Problemas 3D	113
Apêndice 4.1 — Método de Rayleigh-Ritz na Formulação Variacional	115
Apêndice 4.2 — Levantamento das Singularidades nos Integrais da Aplicação do Método dos Momentos ao Condensador Plano de Placas Finitas	116
5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	119
5.1 Introdução	121
5.2 Problemas 1D	128
5.3 Problemas 2D	139
5.4 Programa FEM	150
5.5 Problemas 3D	158
Apêndice 5.1 — Campo Elétrico do Cabo Coaxial Calculado pelo FEM	164
Apêndice 5.2 — Aproximação Linear da Condição de Neumann	165

Apêndice 5.3 — Estrutura de Dados de um Programa de FEM para Problemas de Campo 2D Escalar que Satisfaz uma Equação Diferencial Elíptica (FEM_2D_ELIT)	166
Apêndice 5.4 — Fluxograma do Programa FEM_2D_ELIT	168
Apêndice 5.5 — Fluxograma do Programa de Pós-Processamento do FEM para Cálculo de Capacidades (CAPACIDADE_FEM_2D_ELIT)	175
6 MÉTODO DOS ELEMENTOS DE FRONTEIRA — MÉTODOS HÍBRIDOS	181
6.1 Método dos Elementos de Fronteira	185
6.2 Métodos Híbridos	193
6.2.1 Método Híbrido FEM/BEMA	196
6.2.1.1 Problemas 2D em Planos Transversais	197
6.2.1.2 Problemas com Simetria Axial	211
Apêndice 6.1 — Fórmulas de Integração Aplicáveis para o BEM	216
Apêndice 6.2 — Aproximação da Equação (6.4) para problemas 3D	217
Apêndice 6.3 — Função de Green para Problemas com Simetria Axial	218
7 PROBLEMAS DO CAMPO MAGNÉTICO	221
7.1 Formulação Diferencial	223
7.2 Formulação Integral	224
7.3 Formulação Variacional	225
7.4 Formulação do FEM	227
7.5 Potencial Escalar em Problemas do Campo Magnético	228
7.6 Problemas 2D	231
7.6.1 Problemas de correntes axiais	231
7.6.2 Problemas com simetria axial	232
7.7 Problemas Não-Lineares — Efeito da Saturação Magnética	242
7.8 Elementos Aresta (<i>Edge Elements</i>)	245
Apêndice 7.1 — Funções de Green Diádicas	256
Apêndice 7.2 — Lei de Biot-Savart	257
Apêndice 7.3 — Integração de (7.46)	258

8	PROBLEMAS DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO EM MEIOS BONS CONDUTORES	261
8.1	Formulações do Campo	263
8.1.1	Formulação Diferencial do Campo	264
8.1.2	Formulação Variacional	265
8.2	Campo Harmônico no Tempo — Domínio da Frequência	266
8.2.1	Formulação Variacional	266
8.2.2	Formulações Integrais	267
8.2.3	Problemas 2D de Correntes Axiais	268
8.2.4	Problemas com simetria axial	277
8.2.5	Problemas 3D — Elementos Aresta	282
8.3	Campo Eletromagnético em Meios Condutores no Domínio do Tempo	286
8.3.1	Formulações Variacionais Duais	286
8.3.2	Resolução no Domínio do Tempo	287
8.3.2.1	Caso Linear	289
8.3.2.2	Caso Não-Linear	292
	Apêndice 8.1 — Solução para Condutores Ocos de Espessura Infinita	300
	Apêndice 8.2 — Solução da Linha Bifilar em Coordenadas Polares	300
	Apêndice 8.3 — Preditor de (8.103)	302
9	EQUAÇÕES HOMOGÊNEAS	303
9.1	Valores Próprios — Propriedades	306
9.2	Valores Próprios dos Campos Aproximados	308
9.3	Guia de Onda de Paredes Conductoras Perfeitas	310
	Apêndice 9.1 — Equivalência entre o Método de Galerkin e o Variacional para o Estabelecimento da Equação de Valores Próprios (9.16)	315
10	MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS NO DOMÍNIO DO TEMPO	317
10.1	Algoritmo de Yee	320
10.1.1	Convergência e Estabilidade	322
10.2	Condições de Fronteira Absorventes	323
10.3	Camada de Adaptação Perfeita para Absorção de Ondas Eletromagnéticas	325
A	ANEXO — REVISÃO DO FORMALISMO MATEMÁTICO	331
A.1	Produto Escalar e Vetorial	334

A.2	Operadores Diferenciais	334
A.2.1	Identidades da Análise Vetorial e Diferencial	334
A.2.2	Operadores Diferenciais	335
A.2.3	Teoremas de Stokes, da Divergência e de Green	336
A.3	Espaços Funcionais	338
A.3.1	Espaço Linear	338
A.3.2	Espaço Linear com Métrica	339
A.3.3	Operadores Lineares	343
Apêndice A.1	— Verificação da Formulação Variacional	345
REFERÊNCIAS		347
ÍNDICE REMISSIVO		355