

Índice

Prefácio	i
Prólogo	iii
Constantes Físicas	vi
1 - Introdução Matemática	
1.1 - Sistemas de Coordenadas	1
1.2 - Operadores Diferenciais	
1.2.1 - Operador gradiente	6
1.2.2 - Operador divergência	10
1.2.3 - Operador rotacional	15
1.3 - Campos Conservativos e Campos Solenoidais	
1.3.1 - Campo vetorial conservativo	21
1.3.2 - Campo vetorial solenoidal	22
1.4 - Operador Laplaciano e Identidades Relevantes	
1.4.1 - Operadores laplaciano de um escalar e laplaciano de um vetor	24
1.4.2 - Identidades relevantes envolvendo operadores diferenciais	25
Apêndice 1-A - Operador divergência em coordenadas cartesianas	26
Apêndice 1-B - Operador divergência em coordenadas curvilíneas	27
Apêndice 1-C - Operador rotacional em coordenadas cartesianas	28
Apêndice 1-D - Operador rotacional em coordenadas curvilíneas	30
Apêndice 1-E - Significado do laplaciano de um escalar	32
Apêndice 1-F - Demonstração de uma relação vetorial	33
2 - Eletrostática no Vácuo	
2.1 - Interação Eletrostática	
2.1.1 - Carga elétrica fundamental	35
2.1.2 - Lei de Coulomb	36
2.1.3 - Sistemas de dimensões	37
2.1.4 - Sistemas de unidades	38
2.1.5 - Ordens de grandeza	40
2.2 - Campo Eletrostático e Potencial Elétrico	
2.2.1 - Campo eletrostático	40
2.2.2 - Potencial elétrico	41
2.2.3 - Diferença de potencial entre dois pontos	42
2.3 - Princípio da Sobreposição	
2.3.1 - Distribuição discreta de cargas elétricas	43
2.3.2 - Distribuições contínuas de carga elétrica	48
2.4 - Fluxo do Campo Eletrostático	
2.4.1 - Teorema de Gauss	56
2.4.2 - Determinação de campos eletrostáticos	60

2.5 - Caracterização do Campo Eletrostático	
2.5.1 - Descontinuidades das componentes do campo	63
2.5.2 - Forma diferencial do teorema de Gauss	65
2.5.3 - Propriedades das linhas de força do campo	66
2.6 - Energia Eletrostática	
2.6.1 - Energia de uma distribuição discreta de cargas	71
2.6.2 - Conservação da energia	74
2.6.3 - Energia de distribuições contínuas de carga	76
2.6.4 - Expressão de Maxwell para a energia	78
2.7 - Distribuições Multipolares de Carga Elétrica	
2.7.1 - Dipolo elétrico	80
2.7.2 - Distribuições discretas de cargas elétricas	85
2.7.3 - Quadripolo linear	86
Apêndice 2-A - Experiência de Millikan	88
Apêndice 2-B - Campo criado por uma esfera eletrizada em superfície	89
Apêndice 2-C - Energia de um cristal iônico	91
Apêndice 2-D - Expressão da energia segundo Maxwell	93
Apêndice 2-E - Dipolo elétrico num campo não uniforme	96
Apêndice 2-F - Interação entre dois dipolos elétricos	97
Apêndice 2-G - Potencial de uma distribuição discreta de cargas	99
Apêndice 2-H - Descrição clássica do átomo de hidrogénio	101
3 - Eletrostática na Presença de Condutores	
3.1 - Condutores em Equilíbrio Eletrostático	
3.1.1 - Propriedades de um condutor em equilíbrio eletrostático	103
3.1.2 - Capacidade de um condutor isolado	107
3.1.3 - Condutor com uma cavidade	109
3.1.4 - Teorema dos elementos correspondentes	112
3.1.5 - Problema fundamental da eletrostática	112
3.1.6 - Propriedades dos coeficientes de capacidade	114
3.1.7 - Propriedades dos coeficientes de potencial	115
3.2 - Condensadores	
3.2.1 - Capacidade de um condensador	120
3.2.2 - Associações de capacidades	123
3.3 - Condutores Conhecidos os Potenciais	
3.3.1 - Equação de Laplace	125
3.3.2 - Problema fundamental da eletrostática	127
3.3.3 - Método das imagens simétricas	130
3.4 - Energia e Forças com Condutores	
3.4.1 - Energia de um sistema de condutores	135
3.4.2 - Forças ponderomotrizes	136
Apêndice 3-A - Unicidade da solução do problema fundamental da eletrostática	142
Apêndice 3-B - Coeficientes de capacidade e de potencial mútuos	143
Apêndice 3-C - Capacidade de um condensador	145
Apêndice 3-D - Força entre uma carga pontual e um plano condutor	146

Apêndice 3-E - Condutor esférico na presença de uma carga pontual	147
Apêndice 3-F - Esfera metálica num campo elétrico exterior: Oscilações de Mie	150
4 - Eletrostática na Presença de Dielétricos	
4.1 - Polarização de um Dielétrico	
4.1.1 - Mecanismos de polarização	155
4.1.2 - Intensidade de polarização	157
4.2 - Campo Eletrostático de um Dielétrico	
4.2.1 - Distribuição equivalente de Poisson	158
4.2.2 - Equações fundamentais na presença de dielétricos	160
4.2.3 - Classificação dos dielétricos	161
4.2.4 - Vetor deslocamento elétrico	164
4.3 - Energia e Forças em Meios Dielétricos	
4.3.1 - Energia em meios dielétricos	169
4.3.2 - Forças em meios dielétricos	173
Apêndice 4-A - Esfera dielétrica com polarização uniforme	177
Apêndice 4-B - Esfera dielétrica na presença de um campo elétrico exterior	180
Apêndice 4-C - Campo eletrostático no interior de uma cavidade num dielétrico	182
Apêndice 4-D - Polarizabilidade de um átomo ou de uma molécula não polar	183
Apêndice 4-E - Interação dipolo-dipolo induzido	184
Apêndice 4-F - Permittividade de uma substância polar	185
Apêndice 4-G - Dimensionamento de um condensador cilíndrico	186
5 - Corrente Elétrica	
5.1 - Conceitos Fundamentais de uma Corrente Elétrica	
5.1.1 - Grandezas características de uma corrente elétrica	189
5.1.2 - Equação da continuidade	192
5.1.3 - Corrente elétrica estacionária	194
5.2 - Condução da Corrente Elétrica	
5.2.1 - Lei de Ohm	195
5.2.2 - Equações fundamentais da corrente elétrica estacionária	196
5.2.3 - Tempo de relaxação de um material	197
5.2.4 - Condutor percorrido por uma corrente elétrica estacionária	199
5.2.5 - Resistência elétrica de um condutor	199
5.3 - Estabelecimento de uma Corrente Elétrica	
5.3.1 - Força-eletromotriz de um circuito	205
5.3.2 - Funcionamento de uma bateria	207
5.3.3 - Atividade dos campos aplicados e efeito de Joule	211
5.4 - Circuitos Elétricos em Corrente Estacionária	
5.4.1 - Leis de Kirchhoff	214
5.4.2 - Circuitos lineares em regime estacionário	217
5.4.3 - Teorema de Thévenin	224
Apêndice 5-A - Corrente elétrica estacionária num cabo condutor	228
Apêndice 5-B - Campos aplicados na junção de condutores diferentes	232
Apêndice 5-C - Demonstração do teorema de Thévenin	233

Apêndice 5-D - Ponte de Wheatstone	235
Apêndice 5-E - Associações de resistências em estrela e em triângulo	237
Apêndice 5-F - Reciprocidade de um quadripolo elétrico	239
Apêndice 5-G - Efeito de campos de carga de espaço: Descarga elétrica num gás	243
Apêndice 5-H - Descarga elétrica num gás a baixa pressão	248

6 - Magnetostática no Vácuo

6.1 - Campo de Indução Magnética	
6.1.1 - Experiências e lei de Ampère	253
6.1.2 - Leis de Biot-Savart e de Laplace	256
6.1.3 - Potencial vetor magnético	263
6.1.4 - Equações fundamentais do campo de indução magnética	266
6.1.5 - Determinação de campos de indução magnética	268
6.1.6 - Descontinuidades das componentes do campo de indução magnética	274
6.2 - Forças Magnéticas	
6.2.1 - Campos e forças de cargas elétricas em movimento	278
6.2.2 - Movimento ciclotrónico	281
6.2.3 - Efeito de Hall	283
6.3 - Fluxo Magnético	
6.3.1 - Fluxo do campo de indução magnética	286
6.3.2 - Influência magnética entre circuitos	287
6.4 - Dipolo Magnético	
6.4.1 - Dipolo magnético sob o efeito de um campo exterior	290
6.4.2 - Potencial vetor de um dipolo magnético	293
Apêndice 6-A - Potencial vetor magnético solenoidal	296
Apêndice 6-B - Bobinas de Helmholtz	297
Apêndice 6-C - Coeficiente de auto-indução de um cabo coaxial	299
Apêndice 6-D - Esfera eletrizada em rotação	301
Apêndice 6-E - Ação de um campo magnético não uniforme	303
Apêndice 6-F - Pressão do campo magnético	304
Apêndice 6-G - Forças longitudinais de Ampère	307

7 - Indução Eletromagnética

7.1 - Correntes Induzidas	
7.1.1 - Experiências de Faraday	309
7.1.2 - Campos elétricos induzidos devido ao movimento	312
7.1.3 - Lei de Faraday	314
7.1.4 - Campo magnético variável	321
7.2 - Energia e Forças Magnéticas	
7.2.1 - Circuito com um coeficiente de auto-indução não desprezável	323
7.2.2 - Circuito RL	324
7.2.3 - Energia magnética de circuitos percorridos por corrente	327
7.2.4 - Expressão de Maxwell para a energia	328
7.2.5 - Forças magnéticas	331
Apêndice 7-A - Teorema do corte de fluxo	335

Apêndice 7-B - Energia magnética	337
Apêndice 7-C - Forças magnéticas	341
Apêndice 7-D - Correntes de eddy (ou de Foucault)	343

8 - Magnetostática na Presença da Matéria

8.1 - Efeito das Correntes de Magnetização	
8.1.1 - Correntes elementares de Ampère	345
8.1.2 - Distribuição equivalente de Ampère	347
8.1.3 - Equações fundamentais do campo magnético na matéria	349
8.1.4 - Vetor excitação magnética H	350
8.2 - Materiais Magnéticos	
8.2.1 - Classificação dos materiais magnéticos	353
8.2.2 - Substâncias paramagnéticas	353
8.2.3 - Substâncias diamagnéticas	355
8.2.4 - Substâncias ferromagnéticas	357
8.3 - Circuitos Magnéticos	
8.3.1 - Enrolamento sobre um circuito magnético com a forma toroidal	360
8.3.2 - Circuito magnético com um entreferro	362
8.3.3 - Coeficientes de indução e energia magnética	364
Apêndice 8-A - Explicação do diamagnetismo	369
Apêndice 8-B - Circuito magnético toroidal	370
Apêndice 8-C - Aplicação do teorema de Ampère	371
Apêndice 8-D - Perdas por histerese	372
Apêndice 8-E - Interação entre ímãs permanentes	373

9 - Campo Eletromagnético Variável

9.1 - Interdependência Entre os Campos Elétrico e Magnético	
9.1.1 - Densidade de corrente de deslocamento	381
9.1.2 - Significado físico da densidade de corrente de deslocamento	383
9.1.3 - Descarga de um condensador	386
9.1.4 - Corrente de deslocamento na descarga de um condensador	389
9.2 - Equações do Campo Eletromagnético Variável	
9.2.1 - Equações de Maxwell	391
9.2.2 - Condições fronteira do campo eletromagnético	392
9.2.3 - Leis de Kirchhoff em regime variável	393
9.3 - Leis de Conservação do Campo Eletromagnético	
9.3.1 - Conservação da energia eletromagnética	395
9.3.2 - Conservação da quantidade de movimento e do momento angular	401
Apêndice 9-A - Conservação da quantidade de movimento	403
Apêndice 9-B - Paradoxo do disco de Feynman	408

10 - Circuitos Elétricos em Regime Variável

10.1 - Circuitos Elétricos em Regime Transitório	
10.1.1 - Circuitos lineares de parâmetros concentrados	413
10.1.2 - Circuito RL	414
10.1.3 - Circuito RC	416

10.1.4 - Oscilações livres num circuito LC	419
10.1.5 - Soluções livres amortecidas num circuito RLC	421
10.2 - Circuitos Elétricos em Regime Forçado Sinusoidal	
10.2.1 - Notação complexa aplicada aos circuitos elétricos	427
10.2.2 - Leis de Kirchhoff em regime quase-estacionário	430
10.2.3 - Potência de circuitos elétricos em regime forçado sinusoidal	436
10.3 - Transformador	439
Apêndice 10-A - Soluções do oscilador harmónico livre com atrito	443
Apêndice 10-B - Filtros passa baixo, passa alto e passa banda	445
Apêndice 10-C - Fator de qualidade de um circuito	448
11 - Ondas Eletromagnéticas	
11.1 - Propagação de Ondas Eletromagnéticas	
11.1.1 - Equação de propagação de uma onda	453
11.1.2 - Propagação de ondas eletromagnéticas	457
11.1.3 - Aproximação de onda plana	459
11.1.4 - Equações de Maxwell no espaço recíproco	461
11.1.5 - Carácter transversal das ondas eletromagnéticas	462
11.2 - Polarização e Energia das Ondas Eletromagnéticas	
11.2.1 - Polarização das ondas eletromagnéticas	464
11.2.2 - Energia das ondas eletromagnéticas	470
Apêndice 11-A - Propagação num meio com perdas	474
Apêndice 11-B - Atraso do campo magnético num meio com perdas	477
Apêndice 11-C - Propagação entre duas placas condutoras paralelas	478
12 - Ótica Ondulatória	
12.1 - Reflexão e Refração das Ondas Eletromagnéticas	
12.1.1 - Incidência oblíqua na superfície de separação de dois meios	481
12.1.2 - Determinação das amplitudes das ondas refletida e transmitida	484
12.1.3 - Balanço de energia	492
12.2 - Interferências das Ondas Eletromagnéticas	
12.2.1 - Termo de interferências	496
12.2.2 - Experiência das fendas de Young	500
12.2.3 - Lâmina de faces paralelas	504
12.3 - Difusão da Luz	
12.3.1 - Índice de refração de um meio dielétrico	508
12.3.2 - Decomposição da luz por um prisma	510
12.4 - Difração da Luz	
12.4.1 - Fenómeno da difração da luz	513
12.4.2 - Difração de Fraunhofer	515
12.4.3 - Redes de difração	519
Apêndice 12-A - Reflexão total	522
Apêndice 12-B - Ângulo de desvio mínimo	524
Apêndice 12-C - Teoria escalar da difração	525
Apêndice 12-D - Difração de Fraunhofer por uma abertura circular	528

Apêndice 12-E - Transição da difração de Fraunhofer para a difração de Fresnel	530
Apêndice 12-F - Intensidade de uma rede de difração	532
Apêndice 12-G - Limite geométrico da ótica ondulatória	534
Formulário Matemático	539
Bibliografia	541
Índice Remissivo	543