

# SUMÁRIO

Apresentação.....	19
Agradecimentos .....	21
1. Circuitos: Elementos .....	23
1.1 A Base Teórica .....	23
1.2 Circuitos Elétricos .....	25
1.3 Capacitores .....	26
1.4 Indutores .....	29
1.5 Resistores .....	31
1.6 Fontes de Tensão .....	33
1.7 Circuitos e Circuitos .....	34
1.8 Um Exemplo de Circuito .....	35
2. Circuito RLC .....	37
2.1 Equação Diferencial .....	38
2.2 Solução da Equação Diferencial .....	39
2.3 Caso 1: $R_{eq}^2 \neq 4L/C \rightarrow \Delta \neq 0$ .....	40
2.3.1 Caso 1a: Sistema Subamortecido, $R_{eq}^2 < 4L/C \rightarrow \Delta < 0$ .....	41
2.3.2 Caso 1b: Sistema Superamortecido, $R^2 > 4L/C \rightarrow \Delta > 0$ .....	44
2.4 Caso 2: $R^2 = 4L/C \rightarrow \Delta = 0$ .....	45
2.5 Exercícios.....	46

3.	Circuitos LC, RL, RC .....	49
3.1	Circuito LC .....	49
3.2	Circuito RL .....	53
3.3	Circuito RC .....	55
3.4	Exercícios.....	58
4.	Circuitos com Corrente Alternada .....	61
4.1	Introdução .....	61
4.2	Circuito RLC em Série.....	62
4.3	Oscilações Forçadas .....	63
4.4	Solução da Equação Não Homogênea .....	63
4.5	As Energias no Regime Estacionário .....	65
4.6	Exercícios.....	68
5.	Ressonância em Circuitos com Corrente Alternada .....	71
5.1	Um Diálogo entre Duas Frequências .....	71
5.2	O Papel da Fase .....	74
5.3	As Trocas de Energia .....	75
5.4	Ressonância .....	76
5.5	Exercícios.....	78
6.	Circuitos com Corrente Alternada: Impedância .....	79
6.1	Motivação.....	79
6.2	O Método das Impedâncias .....	81
6.3	Impedância dos Elementos.....	84
6.3.1	Indutor .....	84
6.3.2	Capacitor.....	84
6.3.3	Resistor .....	85
6.4	Potência .....	89
6.5	Exercícios.....	90
7.	Circuito LC Infinito .....	93
7.1	Introdução .....	93
7.2	Linhas de Transmissão .....	94
7.3	Circuito LC Infinito.....	96
7.3.1	Dois Regimes de Frequência.....	98
7.4	Tensão no Primeiro Capacitor .....	99
7.5	Tensão ao Longo do Circuito LC Infinito .....	102
7.6	Exercícios.....	103
8.	Linha de Transmissão .....	105
8.1	Introdução .....	105

8.2	Tensão na Linha de Trasmissão .....	106
8.2.1	A Velocidade da Onda.....	108
8.3	Algumas Propriedades Gerais de Ondas Unidimensionais.....	109
8.4	As Formas das Ondas.....	112
8.5	Exercícios.....	114
9.	Linha de Transmissão: Cargas, Correntes e Campos .....	115
9.1	Os Cálculos .....	115
9.2	Os Resultados .....	117
9.3	Comprimentos de Onda .....	118
9.4	Densidade de Carga .....	118
9.5	A Corrente Elétrica.....	119
9.5.1	A Velocidade dos Elétrons e a Velocidade da Onda.....	120
9.6	Os Campos .....	122
9.7	O Interior da Linha de Transmissão.....	122
9.8	A Propagação dos Campos.....	126
9.9	Exercícios.....	127
10.	Linha de Transmissão: Energia .....	129
10.1	Potência e Vetor de Poynting.....	129
10.2	O Vetor de Poynting na Linha de Transmissão.....	131
10.3	A Conservação da Energia e o Teorema de Poynting .....	131
10.4	Exercícios.....	136
11.	Ondas no Vácuo .....	139
11.1	Equação de Onda.....	140
11.2	Luz É Onda Eletromagnética.....	141
11.3	Ondas Planas .....	142
11.4	Ondas no Vácuo: Propriedades Gerais .....	146
11.5	Espectro Eletromagnético .....	147
11.6	Exercícios.....	148
12.	Ondas no Vácuo: Propagação e Energia .....	149
12.1	Introdução .....	149
12.2	O Vetor de Onda .....	150
12.3	As Três Direções Importantes .....	152
12.4	As Energias Elétrica e Magnética .....	154
12.4.1	A Conservação da Energia Eletromagnética .....	154
12.5	Intensidade de uma Onda .....	156
12.6	Exercícios.....	157
13.	Ondas Eletromagnéticas: Superposição e Polarização .....	159

13.1	Introdução .....	159
13.2	Polarização Plana .....	161
13.3	Filtros Polarizadores .....	162
13.3.1	Lei de Malus .....	164
13.4	Polarizações Circular e Elíptica .....	165
13.5	Existe a Polarização Verdadeira? .....	167
13.6	Ondas Estacionárias .....	167
13.7	Exercícios .....	170
14.	Interferência .....	171
14.1	Introdução .....	171
14.2	Frentes de Onda .....	171
14.3	Superfícies Nodais .....	172
14.4	Franjas de Interferência .....	173
14.5	Aspectos Geométricos, Ondulatórios e Eletromagnéticos .....	176
14.6	Princípio de Huygens .....	177
14.7	Difração e Interferência .....	178
14.8	Exercícios .....	179
15.	Interferência por Duas Fendas Estreitas .....	181
15.1	Um Experimento Clássico .....	181
15.2	Duas Fendas Estreitas .....	182
15.3	As Franjas de Interferência .....	185
15.4	A Energia .....	186
15.5	Anteparos Cilíndricos .....	188
15.6	Exercícios .....	188
16.	Difração em Fendas Largas .....	191
16.1	Introdução .....	191
16.2	Uma Fenda Larga .....	191
16.3	Duas Fendas Largas .....	194
16.4	Exercícios .....	196
17.	Relatividade: Impacto e Princípios .....	197
17.1	O Impacto na Ciência .....	197
17.2	O Impacto na Física .....	198
17.3	O Absoluto .....	200
17.4	Teorias .....	203
17.5	O Dedo e a Lua .....	204
17.6	A Origem da Relatividade .....	205
17.7	Os Princípios da Teoria da Relatividade Restrita .....	206
17.8	Covariância .....	207

18. Dilatação do Tempo .....	211
18.1 Referenciais, Personagens e Notação .....	211
18.1.1 Trens ou Foguetes? .....	213
18.2 Sobre os Efeitos da Relatividade .....	213
18.3 Os Relógios e o Tempo, as Réguas e o Espaço .....	214
18.4 O Relógio de Luz .....	214
18.5 Intervalos de Tempo Clássico e Relativístico .....	216
18.6 Interpretação dos Resultados .....	220
18.7 Sincronização .....	221
18.8 A Simetria da Dilatação .....	222
18.9 Relatividade e Bagunça .....	222
18.10 Exercícios .....	222
19. Contração do Espaço e Quebra da Simultaneidade .....	225
19.1 Contração do Espaço .....	225
19.2 A Contração do Espaço e o Segundo Princípio .....	227
19.3 A Realidade da Dilatação do Tempo e da Contração do Espaço .....	229
19.4 A Simultaneidade Não É Absoluta .....	231
19.5 Noção de Simultaneidade na Relatividade .....	232
19.6 A Simultaneidade É Relativa .....	233
19.7 Exercícios .....	234
20. Transformações de Lorentz .....	237
20.1 Eventos .....	237
20.2 Perspectivas .....	238
20.3 Transformações de Lorentz .....	239
20.3.1 Perspectivas e o Segundo Princípio .....	240
20.3.2 A Forma das Transformações .....	242
20.4 A Transformação Inversa .....	245
20.5 A Importância do Evento de Referência .....	246
20.6 O Limite Newtoniano .....	247
20.7 Exercícios .....	248
21. Transformações de Lorentz: Tempo e Espaço .....	249
21.1 Cinemática Relativística .....	249
21.2 Fotos de um Relógio em Movimento .....	254
21.2.1 A Dilatação do Tempo e o Relógio .....	257
21.2.2 A Uniformidade do Tempo .....	257
21.2.3 As Fotos Tiradas por João .....	258
21.3 A Simetria da Dilatação do Tempo .....	259
21.4 Exercícios .....	261

22. Transformações de Lorentz: Espaço e Tempo .....	263
22.1 A Contração de uma Régua .....	263
22.2 Dardos Cravados em um Trem .....	265
22.3 Sinais Luminosos .....	268
22.4 O Paradoxo das Gêmeas .....	270
22.4.1 Outras Formulações .....	272
22.4.2 Uma Confirmação Experimental.....	272
22.5 Exercícios.....	273
23. Adição de Velocidades .....	275
23.1 A Velocidade Limite .....	275
23.2 Adição de Velocidades na Relatividade.....	277
23.2.1 O Limite de Baixas Velocidades .....	279
23.3 Exercícios.....	286
24. Relatividade: Transformações de Campos e Densidades .....	287
24.1 Eletromagnetismo e Relatividade .....	287
24.2 A Invariância da Carga Elétrica .....	288
24.3 A Covariância das Equações de Maxwell .....	289
24.4 A Transformação dos Campos.....	290
24.4.1 Resumo Parcial: Campos.....	293
24.5 As Transformações das Densidades de Carga e de Corrente.....	294
24.5.1 Resumo Parcial: Densidades .....	296
24.6 Covariância e Leis Físicas .....	297
24.7 Exercícios.....	297
25. Eletromagnetismo: Mudanças de Referencial.....	299
25.1 Dielétrico Carregado .....	299
25.2 Capacitor Plano .....	301
25.3 Capacitor Plano em Movimento Transversal.....	305
25.4 Exercício.....	306
26. Covariância: Cargas, Correntes e Campos .....	307
26.1 Densidades de Carga e de Corrente de um Fio .....	307
26.2 Fio com Corrente: Campos.....	310
26.2.1 Campos em $S_J$ .....	310
26.2.2 Campos em $S_M$ .....	312
26.3 Onda Eletromagnética .....	315
26.4 Exercícios.....	317
27. Campos de uma Carga em Movimento Uniforme .....	319
27.1 As Formas dos Campos Elétrico e Magnético.....	319

27.2	Interpretação dos Resultados.....	323
27.3	Um Pouco de Intuição .....	326
27.4	O Campo Magnético .....	329
27.5	Exercícios.....	331
28.	Cargas Aceleradas .....	333
28.1	A Direção do Campo Elétrico .....	333
28.2	O Efeito da Aceleração.....	336
28.3	Campos e Inércia .....	339
28.4	A Inércia Eletromagnética .....	341
28.5	Exercícios.....	342
29.	Radiação.....	345
29.1	Cargas Aceleradas .....	345
29.2	Movimento Uniforme e Aceleração .....	345
29.3	Radiação .....	349
29.4	Processos Usuais de Produção de Radiação.....	352
29.5	Eletromagnetismo e Mecânica Antes da Relatividade .....	354
29.6	Exercícios.....	355
30.	Radiação: O Espelho .....	357
30.1	Plano Infinito Sujeito a Acelerações Bruscas .....	358
30.2	Luz Incide Sobre um Espelho .....	359
30.3	O Movimento dos Elétrons Livres no Interior do Metal.....	360
30.4	Radiação do Espelho .....	361
30.5	O Balanço Energético.....	363
30.6	A Luz Bate no Espelho... ..	364
30.7	A Luz Empurra o Espelho .....	366
30.8	O Momento Linear da Luz .....	367
30.9	O Vetor de Poynting.....	369
31.	Campos Magnéticos Estáticos na Matéria: Diamagnetismo e Paramagnetismo .....	371
31.1	O Vácuo e a Matéria .....	371
31.2	Perturbando a Matéria .....	372
31.3	Fenômenos Magnéticos .....	373
31.4	Diamagnetismo .....	376
31.4.1	A Susceptibilidade Negativa.....	380
31.4.2	As Forças .....	381
31.5	Paramagnetismo .....	381
31.5.1	A Intensidade do Paramagnetismo.....	383
31.5.2	As Forças .....	384

31.6	Exercícios.....	384
32.	Campos Magnéticos Estáticos na Matéria: Ferromagnetismo .....	385
32.1	Introdução .....	385
32.2	Átomos de Ferro e Efeitos Coletivos .....	386
32.3	Domínios Magnéticos .....	388
32.3.1	Paredes dos Domínios .....	388
32.4	Histerese .....	390
32.5	Efeito da Temperatura .....	391
33.	Campos Elétricos Estáticos na Matéria .....	393
33.1	O Campo Eletrostático em Presença da Matéria .....	393
33.2	Polarização .....	394
33.3	Molas Matemáticas .....	396
33.4	Susceptibilidade Elétrica.....	398
33.5	Capacitor Plano com Dielétrico.....	399
33.5.1	Campos e Cargas .....	399
33.5.2	A Escala das Deformações.....	401
33.5.3	Potencial .....	401
33.5.4	Energia .....	402
33.6	Capacitor com Dielétrico Ligado a Bateria .....	403
33.7	Exercícios.....	404
34.	Um Dielétrico Esférico.....	407
34.1	A Esfera Dielétrica .....	407
34.2	O Campo Induzido $\vec{E}_{\text{ind}}$ .....	409
34.3	O Campo Resultante no Interior do Dielétrico .....	410
34.4	Exercícios.....	410
35.	Ondas em Meios Materiais: Condutores .....	411
35.1	Óptica e Eletromagnetismo .....	411
35.2	Meios Materiais .....	412
35.3	Ondas no Interior de Meios Materiais.....	413
35.4	Modelo de Drude para Condutores .....	415
35.4.1	Etapa 1: As Forças .....	415
35.4.2	Etapa 2: O Movimento do Elétron .....	416
35.4.3	Etapa 3: A Densidade de Corrente.....	417
35.4.4	Etapa 4: As Equações de Maxwell no Interior do Metal .....	418
35.4.5	Etapa 5: Equações de Onda.....	419
35.4.6	Etapa 6: Os Campos no Interior do Metal .....	420
35.4.7	Em Resumo... ..	421
35.5	Propagação, Atenuação e a Frequência de Plasma.....	422



35.6	Exercícios.....	423
36.	Ondas em Meios Materiais: O Caso da Prata.....	425
36.1	O Caso da Prata.....	426
36.2	Abaixo da Frequência de Plasma.....	427
36.3	Acima da Frequência de Plasma.....	428
36.4	Os Dois Regimes e a Lei de Ohm.....	429
36.5	Os Campos no Interior do Metal.....	430
36.6	Limitações do Modelo de Drude.....	432
36.7	Exercícios.....	432
37.	Ondas em Meios Materiais: Dielétricos.....	435
37.1	Ondas em Dielétricos.....	435
37.2	Modelo de Drude para Dielétricos.....	436
37.2.1	Etapa 1: As Forças.....	437
37.2.2	Etapa 2: O Movimento do Elétron.....	438
37.2.3	Etapa 3: A Densidade de Corrente.....	440
37.2.4	Etapa 4: As Equações de Maxwell no Interior do Dielétrico.....	440
37.2.5	Etapas 5 e 6: Equações de Onda e os Campos no Interior do Dielétrico.....	441
37.3	Fenômenos.....	442
37.3.1	A Susceptibilidade Elétrica.....	443
37.3.2	A Ressonância.....	443
37.3.3	Dispersão.....	444
37.4	Exercícios.....	446
38.	Interfaces e Condições de Contorno.....	449
38.1	Introdução.....	449
38.2	As Ondas Refletida e Transmitida.....	450
38.3	Condições de Contorno.....	453
38.3.1	Lei de Faraday.....	453
38.3.2	Lei de Ampère-Maxwell.....	454
38.3.3	Lei de Gauss do Magnetismo.....	454
38.3.4	Lei de Gauss da Eletricidade.....	455
38.4	Condições de Contorno: Resumo.....	456
39.	Extensões Complexas.....	457
39.1	A Notação Complexa.....	458
39.2	Oscilação Forçada.....	458
39.3	Equação de Onda.....	459
39.4	Relação entre os Campos.....	460
39.5	Ondas em Direções Quaisquer.....	461

39.6	Condições de Contorno .....	462
39.7	Um Cuidado com as Extensões Complexas.....	463
40.	Ondas Incidindo em Condutores.....	465
40.1	Os Campos das Ondas Refletida e Transmitida .....	465
40.2	O Balanço Energético.....	468
40.3	O Condutor Perfeito .....	469
40.4	O Caso da Prata .....	470
40.5	Grafite .....	471
40.6	Ouro e Cobre .....	472
40.7	Exercício.....	472
41.	Ondas Incidindo em Dielétricos .....	473
41.1	Os Campos .....	473
41.2	Reflexão e Refração: Aspectos Geométricos.....	474
41.3	Reflexão Total.....	476
41.4	Balanço Energético.....	477
41.4.1	Caso $\alpha$ – Campo Elétrico Perpendicular ao Plano de Incidência.....	477
41.4.2	Caso $\beta$ – Campo Elétrico Paralelo ao Plano de Incidência ...	479
41.4.3	Coefficientes de Reflexão e Transmissão .....	480
41.4.4	O Ângulo de Brewster .....	481
41.5	Um Material Verde .....	481
41.6	Exercícios.....	483
42.	Eletromagnetismo e Fenômenos da Luz.....	485
42.1	Semi-espelhos .....	485
42.2	Polarização .....	486
42.2.1	Polarização por Reflexão.....	487
42.3	As Cores .....	489
42.3.1	As Componentes Monocromáticas da Luz Branca .....	490
42.3.2	As Misturas de Cores .....	491
42.4	As Aparências das Coisas.....	492
42.5	O Céu .....	495
Apêndice A.	Unidades .....	499
A.1	Sistema Internacional de Unidades (SI) .....	499
A.2	Grandezas e Unidades do SI.....	499
A.3	Unidades Alternativas de Massa e Energia .....	501
A.4	Múltiplos e Submúltiplos Decimais de Unidades do SI.....	501
Apêndice B.	Constantes e Alguns Valores Empíricos.....	503

B.1	Constantes Físicas .....	503
B.2	Massas .....	504
B.3	Propriedades de Alguns Metais .....	504
Apêndice C. Sistemas de Coordenadas .....		505
C.1	Sistemas Bidimensionais .....	505
C.2	Sistemas Tridimensionais .....	506
Apêndice D. Relações Vetoriais .....		509
D.1	Identidades Vetoriais .....	509
D.2	Operadores Diferenciais Vetoriais .....	509
Apêndice E. Expansões em Série de Taylor: Relações Aproximadas .....		511
E.1	Fórmula de Euler .....	512
Apêndice F. Algumas Integrais .....		513
Apêndice G. Números Complexos .....		517
Respostas dos Exercícios .....		521
Bibliografia .....		531
Sobre os Autores .....		535