

## SUMÁRIO

Apresentação.....	19
Agradecimentos .....	21
1. O Universo Físico.....	23
1.1 Universos Físicos.....	24
1.2 O Universo Físico Clássico .....	26
1.3 Os Universos Físicos Relativístico e Quântico .....	29
1.4 Em Resumo.....	32
1.5 Exercícios.....	32
2. O Eletromagnetismo .....	33
2.1 Abrangência dos Fenômenos.....	33
2.2 Tecnologia e Ciência .....	34
2.3 Campos .....	35
2.4 As Entidades do Eletromagnetismo Clássico .....	38
2.5 Interação e Superposição .....	40
2.6 Eletromagnetismo e Mecânica Quântica.....	42
2.7 Física e Matemática.....	43
2.8 Eletromagnetismo .....	44
3. A Matéria: Condutores e Dielétricos .....	47
3.1 Sistemas.....	48

3.2	Átomos e Núcleos.....	49
3.3	Aglomerados Covalentes.....	53
3.4	Aglomerados Iônicos.....	55
3.5	Metais.....	56
3.6	Condutores e Isolantes.....	57
3.7	Exercícios.....	58
4.	A Eletrização da Matéria.....	59
4.1	Eletrização por Atrito.....	60
4.2	Indução Eletrostática.....	61
4.3	Eletrização por Contato.....	64
4.4	Aterramento.....	64
4.5	Eletrização por Indução.....	66
4.6	Detecção de Cargas Elétricas: Pêndulo e Eletroscópio.....	67
4.6.1	Pêndulo Elétrico.....	68
4.7	Eletroscópio.....	70
4.7.1	Descobrendo o Sinal da Carga de um Corpo Eletrizado.....	75
4.8	Exercícios.....	75
5.	Densidades de Carga.....	77
5.1	Introdução.....	77
5.2	Densidades Lineares de Carga.....	78
5.3	Densidades Superficiais de Carga.....	82
5.4	Sistemas de Coordenadas, o Mundo e as Representações do Mundo.....	89
5.5	Exercícios.....	89
6.	Cargas no Átomo de Hidrogênio e no Núcleo de Ouro.....	91
6.1	Densidades Volumétricas de Carga.....	91
6.2	O Átomo de Hidrogênio.....	93
6.2.1	Cálculo da Carga Negativa Total.....	95
6.2.2	Esfera que Contém 99% da Carga Negativa do Átomo.....	95
6.3	O Núcleo do Ouro.....	97
6.4	Exercícios.....	98
7.	Carga Elétrica e Campo de Coulomb.....	101
7.1	Os Dois Tipos de Carga e a Sua Conservação.....	101
7.2	A Quantidade de Carga Elementar.....	103
7.3	Cargas Puntiformes.....	104
7.4	A Eletrostática.....	105
7.5	A Lei de Coulomb.....	105
7.6	A Unidade de Carga e a Intensidade da Força Elétrica.....	107
7.7	A Ideia de Campo.....	108

7.8	O Campo Coulombiano .....	109
7.9	Linhas de Campo .....	110
7.10	O Campo Eletrostático, o Espaço e o Tempo .....	111
7.11	Física e Matemática .....	112
7.12	Exercícios .....	113
8.	Campo de Coulomb: Princípio da Superposição .....	115
8.1	Princípio da Superposição .....	115
8.2	Campos e Forças .....	116
8.3	Distribuições Contínuas .....	120
8.4	Exercícios .....	123
9.	Princípio da Superposição: Distribuições Unidimensionais .....	125
9.1	Anel Uniformemente Carregado .....	125
9.1.1	O Papel da Simetria .....	127
9.1.2	O Campo a Grandes Distâncias .....	128
9.2	Dois Anéis Carregados .....	128
9.3	Anel com Densidade de Carga Não Uniforme .....	128
9.4	Meio Anel .....	130
9.5	Exercícios .....	130
10.	Princípio da Superposição: Distribuições Bi e Tridimensionais .....	131
10.1	Disco Uniformemente Carregado .....	131
10.1.1	Limite $ z  \gg R$ .....	133
10.1.2	Limite $ z  \ll R$ .....	133
10.1.3	O Campo no Centro do Disco .....	133
10.2	Disco com Densidade de Carga Não Uniforme .....	134
10.2.1	Limite $ z  \gg R$ .....	135
10.3	Coroa Circular .....	135
10.4	Meia Superfície Esférica .....	136
10.5	Cilindro Uniformemente Carregado .....	137
10.5.1	Limites $ z  \gg R$ e $ z  \gg H$ .....	139
10.6	Exercícios .....	139
11.	Fluxo do Campo Elétrico .....	141
11.1	Introdução .....	141
11.2	Fluxo de um Campo Vetorial .....	142
11.3	Tubos de Campo .....	148
11.4	Exercícios .....	150
12.	Lei de Gauss da Eletricidade .....	151
12.1	Introdução .....	151

12.2	A Expressão da lei .....	151
12.3	A Lei de Coulomb e a Lei de Gauss da Eletricidade .....	152
12.3.1	Carga no Centro de Superfície Esférica .....	153
12.3.2	Carga no Interior de Superfície Qualquer .....	154
12.3.3	Carga Fora da Superfície Gaussiana .....	154
12.3.4	Várias Cargas.....	155
12.4	A Lei de Gauss e a Sua Imagem da Natureza .....	156
12.5	Além da Lei de Coulomb .....	158
12.6	As Aplicações da Lei de Gauss.....	161
12.7	Condutores Metálicos em Equilíbrio Eletrostático.....	161
12.7.1	Equilíbrio no Interior do Metal .....	162
12.7.2	Excessos de Carga Ocupam Superfícies Externas .....	162
12.7.3	O Equilíbrio na Superfície .....	162
12.7.4	O Poder das Pontas .....	163
12.7.5	Blindagem .....	166
12.8	Exercícios .....	167
13.	Lei de Gauss: Exemplos com Simetria Esférica .....	169
13.1	Carga Puntiforme.....	170
13.2	Esfera Uniformemente Carregada.....	171
13.2.1	Campo Fora da Distribuição .....	173
13.2.2	Campo Dentro da Distribuição .....	173
13.2.3	Campo em Todo o Espaço .....	173
13.3	Superfície Esférica Uniformemente Carregada .....	175
13.4	Distribuição Esférica Não Uniforme.....	177
13.4.1	Campo Fora da Distribuição .....	177
13.4.2	Campo Dentro da Distribuição .....	178
13.4.3	Campo em Todo o Espaço .....	178
13.5	Exercícios.....	179
14.	Lei de Gauss: Aplicações .....	181
14.1	Plano Infinito .....	181
14.2	Capacitor Plano .....	183
14.2.1	Solução 1 .....	184
14.2.2	Solução 2.....	185
14.3	Fio Infinito .....	187
14.4	Cilindro Infinito .....	188
14.4.1	Campo Fora da Distribuição .....	189
14.4.2	Campo Dentro da Distribuição .....	189
14.5	Campo Sobre uma Superfície Esférica Uniformemente Carregada ..	190
14.6	Campo nas Proximidades de um Corpo Metálico Carregado .....	192

14.7	Exercícios.....	193
15.	Forças Conservativas e Energia Potencial.....	195
15.1	Sobre Energia e Sua Conservação.....	195
15.2	Interação e Energia.....	196
15.3	Trabalho.....	197
15.4	Forças Conservativas e Não Conservativas.....	199
15.5	Energia Potencial Eletrostática: Duas Cargas.....	200
15.5.1	A Força de Coulomb é Conservativa.....	200
15.5.2	Trabalho e Energia.....	202
15.5.3	Atração e Repulsão.....	203
15.5.4	Energia Potencial e Trabalho.....	204
15.6	Forças Conservativas.....	205
15.7	Forças Centrais.....	205
15.8	Energia Potencial Eletrostática: Várias Cargas.....	207
15.9	Finalmente... ..	208
15.10	Exercícios.....	208
16.	Energia Potencial.....	209
16.1	Carga Puntiforme e Anel Uniformemente Carregado.....	209
16.1.1	Solução 1.....	210
16.1.2	Solução 2.....	211
16.2	Carga Puntiforme e Esfera Uniformemente Carregada.....	211
16.2.1	Solução 1.....	211
16.2.2	Solução 2.....	212
16.3	Poço de Energia Potencial.....	215
16.4	Barreira de Energia Potencial.....	217
16.5	Radiação.....	218
16.6	Exercícios.....	219
17.	Potencial Eletrostático.....	221
17.1	Definição.....	221
17.2	Campo Conservativo.....	222
17.2.1	Unidades.....	223
17.3	Potencial $\leftrightarrow$ Energia Potencial.....	224
17.4	Exercícios.....	229
18.	Densidade de Energia Elétrica.....	231
18.1	O Capacitor.....	231
18.2	Cargas e Campos no Capacitor.....	232
18.3	Cálculo da Energia do Capacitor.....	233
18.4	A Localização da Energia Potencial.....	235

18.5	Cálculo Alternativo da Energia do Capacitor .....	237
18.6	Energia Potencial: Trabalho e Campo .....	237
18.7	Capacitância .....	240
18.8	Exercícios .....	241
19.	Autoenergia .....	243
19.1	Coisas e Sistemas .....	243
19.2	Autoenergia de uma Superfície Esférica Uniformemente Carregada .....	244
19.2.1	Solução 1 .....	244
19.2.2	Solução 2 .....	245
19.2.3	Solução 3 .....	246
19.3	Autoenergia de uma Esfera Carregada Dentro de Casca Condutora Neutra .....	247
19.4	Duas Esferas Conductoras .....	248
19.4.1	Balço Energético e Conservação da Energia .....	249
19.5	Energia e Massa .....	250
19.6	Exercícios .....	251
20.	Autoenergia: Duas Cargas Puntiformes .....	253
20.1	Introdução .....	253
20.2	Autoenergias e Energia de Interação .....	253
20.3	Energia de Interação .....	255
20.3.1	Igual, Mas Diferente .....	257
20.4	A Distribuição da Energia Potencial .....	257
20.5	Atração e Repulsão .....	258
20.6	Um Problema com a Autoenergia... ..	259
21.	Operador Diferencial: Gradiente .....	261
21.1	As Duas Formas das Equações de Maxwell .....	261
21.2	O Gradiente .....	262
21.3	Gradiente na Prática .....	265
21.3.1	A Gradiência e o Gradiente .....	266
21.4	Exercícios .....	268
22.	Operadores Diferenciais Vetoriais: Divergente e Rotacional .....	269
22.1	Introdução .....	269
22.2	Divergente .....	270
22.3	Teorema de Gauss .....	271
22.4	Lei de Gauss na Forma Diferencial .....	274
22.5	O Significado do Divergente .....	275
22.6	O Laplaciano e a Equação de Poisson .....	277

22.7	Rotacional .....	277
22.8	O Significado do Rotacional.....	280
22.9	Teorema de Stokes .....	282
22.10	Campos Conservativos .....	284
22.11	Exercícios.....	284
23.	Resumo da Eletrostática: Características Elétricas dos Núcleons .....	285
23.1	A Estrutura da Eletrostática .....	285
23.2	Características Elétricas do Próton .....	288
23.2.1	Carga .....	288
23.2.2	Campo Elétrico.....	289
23.2.3	Potencial .....	290
23.2.4	Autoenergia.....	291
23.2.5	Força Elétron-Próton .....	292
23.2.6	Energia Potencial do Sistema Elétron-Próton.....	292
23.3	Características Elétricas do Nêutron.....	293
23.3.1	Campo Elétrico.....	293
23.3.2	Densidade de Carga .....	294
23.3.3	Carga .....	294
23.3.4	Força Elétron-Nêutron .....	295
23.4	Exercícios.....	295
24.	Corrente Elétrica e Equação da Continuidade.....	297
24.1	Introdução .....	297
24.2	Antes e Depois das Correntes .....	298
24.3	Corrente Elétrica .....	298
24.4	Densidade de Corrente Elétrica.....	299
24.4.1	Densidade de Corrente e Velocidade .....	300
24.5	Correntes no Vácuo e em Metais.....	302
24.6	Equação da Continuidade .....	304
24.7	Correntes Estacionárias .....	305
24.8	Exercícios.....	308
25.	Lei de Ohm .....	309
25.1	Correntes em Metais .....	309
25.2	A Lei de Ohm Microscópica.....	310
25.2.1	A Forma Geral da Lei de Ohm Microscópica .....	313
25.3	A Lei de Ohm Macroscópica .....	313
25.4	Efeito Joule .....	315
25.5	Leis e Leis .....	316
25.6	Exercícios.....	320

26. Baterias e Fios Metálicos .....	323
26.1 A Bateria .....	323
26.2 A Força Eletromotriz .....	325
26.3 O Fio Metálico Perto da Bateria.....	327
26.4 O Fio Ligado à Bateria .....	328
26.5 Um Interruptor .....	330
26.6 Fios e Encanamentos .....	332
27. Fios Metálicos e Baterias .....	335
27.1 Introdução .....	335
27.2 A Descrição Macroscópica .....	336
27.2.1 Cálculo de $I$ em função de $V$ .....	336
27.2.2 Cálculo de $V$ em Função de $\mathcal{E}_b$ .....	337
27.3 Em Resumo.....	338
27.4 Exercícios.....	343
28. O Campo Magnético: Leis de Gauss e de Biot e Savart .....	345
28.1 Introdução .....	345
28.2 Lei de Gauss do Magnetismo .....	347
28.3 Correntes e Campos Magnéticos.....	347
28.4 Interações Magnéticas.....	348
28.5 Lei de Biot e Savart .....	349
28.6 Correntes em Ímãs .....	354
28.7 Exercícios.....	356
29. Lei de Biot e Savart: Aplicações.....	357
29.1 Fio Retilíneo .....	358
29.2 Espira Quadrada.....	360
29.3 Uma Propriedade Interessante.....	362
29.4 Dois Fios Infinitos Paralelos com Correntes de Mesmo Sentido .....	362
29.5 Dois Fios Infinitos Paralelos com Correntes de Sentidos Opostos ...	364
29.6 Exercícios.....	365
30. Lei de Ampère .....	367
30.1 Lei de Ampère .....	367
30.2 Biot e Savart e Ampère .....	368
30.2.1 Um Detalhe Técnico .....	370
30.2.2 Validade × Utilidade.....	371
30.3 Fio Retilíneo Infinito .....	371
30.4 Fio Cilíndrico Infinito.....	372
30.5 Cabo Coaxial .....	374
30.6 Cilindro Carregado em Rotação .....	376



30.7 Solenoide Cilíndrico .....	378
30.8 Solenoide Toroidal .....	380
30.9 Exercícios.....	381
31. Força de Lorentz .....	383
31.1 Movimento Circular .....	383
31.2 Espectrômetro de Massa .....	385
31.3 Movimento Helicoidal .....	386
31.4 Detecção de Partículas Carregadas .....	387
31.5 A Observação do Elétron .....	387
31.6 Confinamento de Plasmas .....	390
31.6.1 Velocidade de Deriva .....	390
31.7 A Magnetosfera .....	391
31.8 Um Pouquinho de LHC .....	393
31.9 Exercício.....	394
32. Força de Lorentz em Metais.....	395
32.1 Barra Metálica em Movimento num Campo Magnético.....	395
32.2 Disco Metálico em Movimento num Campo Magnético .....	397
32.3 Efeito Hall .....	398
32.4 Força sobre um Fio Percorrido por Corrente .....	400
32.5 Exercícios.....	407
33. Forças sobre Correntes: Aplicações .....	409
33.1 Força Magnética sobre um Fio .....	409
33.2 Torque Sobre uma Espira .....	412
33.2.1 Motores .....	414
33.3 O Campo da Espira e o Campo Externo .....	414
33.4 Exercícios.....	415
34. Lei de Faraday .....	417
34.1 Introdução .....	417
34.2 A Lei de Faraday .....	418
34.2.1 Qual Fluxo... .....	419
34.3 Campos Elétricos Não Conservativos .....	420
34.4 Um Pouco de Intuição .....	420
35. Lei de Faraday: Aplicações .....	427
35.1 Introdução .....	427
35.2 Fio em Movimento .....	427
35.3 Geração de Correntes.....	430
35.4 Espira Circular em um Campo Magnético Variável.....	431

35.4.1	Solução Microscópica.....	431
35.4.2	Solução Macroscópica .....	432
35.5	Espira Quadrada em um Campo Magnético Variável.....	432
35.6	Cálculos Macroscópicos de Correntes em Circuitos .....	434
35.7	Correntes em Espiras Externas a um Solenoide.....	435
35.7.1	Espira ao Lado do Solenoide .....	435
35.7.2	Espira Envolvendo o Solenoide.....	436
35.8	Exercício.....	436
36.	Geração de Correntes: Lorentz ou Faraday? .....	437
36.1	O Ímã e a Espira .....	437
36.2	Fio com Corrente e Espira.....	438
36.2.1	Referencial do Fio – Solução Microscópica .....	438
36.2.2	Referencial do Fio – Solução Macroscópica.....	441
36.2.3	Referencial da Espira – Solução Microscópica.....	441
36.2.4	Referencial da Espira – Solução Macroscópica .....	442
36.3	Em Resumo.....	443
36.4	Exercício.....	444
37.	Indução de Correntes.....	445
37.1	Barra Deslizante sobre Condutor em Forma de U .....	445
37.1.1	Abordagem Microscópica .....	445
37.1.2	Abordagem Macroscópica.....	448
37.1.3	A Conservação da Energia .....	448
37.2	Espira Atravessando uma Região com Campo Magnético.....	449
37.2.1	Referencial do Eletroímã.....	449
37.2.2	Referencial da Espira .....	452
37.2.3	A Conservação da Energia .....	454
37.3	Espira Girando em Campo Magnético Uniforme .....	455
37.3.1	Referencial do Eletroímã.....	455
37.3.2	Referencial da Espira .....	456
37.3.3	Turbinas .....	457
37.4	Exercícios.....	457
38.	Autoindução .....	459
38.1	Introdução .....	459
38.2	O Circuito com o Solenoide Cilíndrico .....	459
38.3	A Autoindução no Solenoide.....	460
38.4	A fem Induzida e a Autondutância .....	462
38.5	A Corrente.....	462
38.5.1	Ordens de Grandeza.....	464
38.6	Desconectando a Bateria.....	465

38.7	Autondutância e Inércia .....	467
38.8	Exercícios.....	468
39.	Autoindução: Campos .....	469
39.1	Introdução .....	469
39.2	O campo Resultante no Interior do Fio .....	469
39.2.1	Campos em $t \leq 0$ .....	471
39.2.2	Campos em $t \rightarrow \infty$ .....	471
39.2.3	O Campo $\vec{E}_{\text{ind}}$ .....	472
39.2.4	Um Mecanismo Sutil.....	473
39.2.5	Os Campos durante a Autoindução.....	473
39.3	As Densidades Superficiais de Carga .....	474
39.3.1	O Campo na Interface.....	475
39.4	Circuitos .....	475
39.5	Exercício.....	476
40.	Energia do Campo Magnético .....	477
40.1	Introdução .....	477
40.2	Balço Energético.....	477
40.2.1	A Bateria e o Resistor .....	478
40.2.2	A Energia do Indutor .....	479
40.3	A Energia do Campo .....	480
40.4	Energia Magnética de um Solenoide Toroidal .....	481
40.4.1	Cálculo a Partir da Autoindutância .....	481
40.4.2	Cálculo a Partir da Densidade de Energia.....	482
40.5	Exercício.....	483
41.	Corrente de Deslocamento .....	485
41.1	Introdução .....	485
41.2	Uma Inconsistência.....	485
41.3	A Lei de Ampère-Maxwell .....	486
41.4	As Equações de Maxwell .....	487
41.5	Correntes em Capacitores .....	488
41.6	Ampère $\times$ Ampère-Maxwell.....	489
41.6.1	Resultados Ambíguos .....	490
41.6.2	Resultados Sem Ambiguidades .....	491
41.7	Exercício.....	496
42.	O Eletromagnetismo .....	499
42.1	Bases do Eletromagnetismo: Um Exemplo .....	500
42.1.1	Os Campos.....	501
42.1.2	Isto Não É Tudo... ..	502

42.1.3 A Corrente no Solenoide.....	502
42.2 O Eletromagnetismo .....	505
42.3 Exercícios.....	505
Apêndice A. Unidades .....	507
A.1 Sistema Internacional de Unidades (SI) .....	507
A.2 Grandezas e Unidades do SI.....	507
A.3 Unidades Alternativas de Massa e Energia .....	509
A.4 Múltiplos e Submúltiplos Decimais de Unidades do SI.....	509
Apêndice B. Constantes e Alguns Valores Empíricos.....	511
B.1 Constantes Físicas.....	511
B.2 Massas .....	512
B.3 Propriedades de Alguns Metais .....	512
Apêndice C. Sistemas de Coordenadas .....	513
C.1 Sistemas Bidimensionais .....	513
C.2 Sistemas Tridimensionais .....	514
Apêndice D. Relações Vetoriais .....	517
D.1 Identidades Vetoriais .....	517
D.2 Operadores Diferenciais Vetoriais .....	517
Apêndice E. Expansões em Série de Taylor: Relações Aproximadas .....	519
Apêndice F. Algumas Integrais .....	521
Respostas dos Exercícios .....	525
Bibliografia .....	535
Sobre os Autores.....	537