

Tratado de Eletromagnetismo



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Reitor

ANTONIO JOSÉ DE ALMEIDA MEIRELLES

Coordenadora Geral da Universidade

MARIA LUIZA MORETTI



Conselho Editorial

Presidente

EDWIGES MARIA MORATO

ALEXANDRE DA SILVA SIMÕES – CARLOS RAUL ETULAIN

CICERO ROMÃO RESENDE DE ARAUJO – DIRCE DJANIRA PACHECO E ZAN

IARA BELELI – IARA LIS SCHIAVINATTO – MARCO AURÉLIO CREMASCO

PEDRO CUNHA DE HOLANDA – SÁVIO MACHADO CAVALCANTE

Eduardo Fontana

Tratado de Eletromagnetismo

EDITORIA
UNICAMP

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP
DIVISÃO DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO
Bibliotecária: Maria Lúcia Nery Dutra de Castro – CRB-8ª / 1724

F734s Fontana, Eduardo.
Tratado de Eletromagnetismo / Eduardo Fontana. – Campinas, SP :
Editora da Unicamp, 2021.

1. Eletromagnetismo. 2. Eletricidade. 3. Condutividade elétrica.
4. Ondas eletromagnéticas. 5. Radiação. I. Título.

CDD – 621.38415
– 621.38
– 537.62
– 621.38131
– 539.2

ISBN 978-85-268-1527-8

Copyright © by Eduardo Fontana
Copyright © 2021 by Editora da Unicamp

Opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas
neste livro são de responsabilidade do autor e não
necessariamente refletem a visão da Editora da Unicamp.

Direitos reservados e protegidos pela lei 9.610 de 19.2.1998.
É proibida a reprodução total ou parcial sem autorização,
por escrito, dos detentores dos direitos.

Foi feito o depósito legal.

Direitos reservados a

Editora da Unicamp
Rua Sérgio Buarque de Holanda, 421 – 3ª andar
Campus Unicamp
CEP 13083-859 – Campinas – SP – Brasil
Tél./Fax: (19) 3521-7718 / 7728
www.editoraunicamp.com.br – vendas@editora.unicamp.br

Ao meu pai, Angelo Fontana (*in memoriam*).
À minha mãe, Aracy Fontana.

Sumário

PREFÁCIO	19
APRESENTAÇÃO	21
Referências bibliográficas	26
INTRODUÇÃO	27
CAPÍTULO 1	
ELEMENTOS DE ÁLGEBRA VETORIAL	31
1.1 Álgebra vetorial	31
1.1.1 Soma de vetores	33
1.1.2 Produto entre vetores	34
A. Produto escalar	34
B. Produto vetorial	34
1.1.3 Decomposição de vetores	35
1.2 Alguns sistemas de coordenadas	37
1.2.1 Coordenadas cartesianas	37
1.2.2 Coordenadas cilíndricas	38
1.2.3 Coordenadas esféricas	38
1.3 Transformação de coordenadas e de vetores	39
1.3.1 Cartesianas-cilíndricas	39
1.3.2 Cilíndricas-esféricas	42
1.3.3 Cartesianas-esféricas	43
1.4 Integrais	45
1.4.1 Integral de linha de uma função	46
1.4.2 Integral de linha de um vetor	50
1.4.3 Integral de superfície	53
1.4.4 Integral de volume	58

1.5 Operações diferenciais com vetores	61
1.5.1 Gradiente	61
1.5.2 Operador nabla	64
1.5.3 Divergente	64
1.5.4 Rotacional	70
1.6 Algumas identidades vetoriais.	76
1.6.1 Uma regra da cadeia para o divergente	76
1.6.2 Uma regra da cadeia para o rotacional	76
1.6.3 Laplaciano	77
1.6.4 Campos irrotacionais	78
1.6.5 Campos solenoidais	78
1.6.6 Outras identidades vetoriais	79
1.7 Alguns teoremas da análise vetorial	83
1.7.1 Teorema de Gauss	83
1.7.2 Teorema de Stokes	84
1.7.3 Identidades de Green	86
1.7.4 Teorema de Helmholtz	86
Notas e referências bibliográficas	88
Problemas.	89
CAPÍTULO 2	
ELETROSTÁTICA.	93
2.1 Campo eletrostático	94
2.1.1 Lei de Coulomb	94
2.1.2 Campo elétrico	95
A. Conceituação do campo elétrico	95
B. Linhas de campo.	96
2.1.3 O conceito de cargas distribuídas	102
2.2 Lei de Gauss para a eletrostática	108
2.2.1 Vetor densidade de fluxo elétrico (deslocamento elétrico).	108
2.2.2 Determinação de campos com o emprego da lei de Gauss	112
2.3 Potencial elétrico.	119
2.3.1 Definição da função potencial	119
2.3.2 Diferença de potencial e circulação do campo elétrico.	126
2.3.3 Energia de uma carga puntiforme em uma região de campos.	128
2.3.4 Energia de uma distribuição de cargas	129
2.4 Equações de Maxwell para a eletrostática no vácuo.	133
2.4.1 Forma integral.	133
2.4.2 Forma diferencial	135
2.4.3 Densidade de energia.	136

2.5 Eletrostática em meios materiais	138
2.5.1 Potencial do dipolo elétrico	138
2.5.2 Campo do dipolo elétrico	142
2.5.3 Dipolo sob ação de um campo elétrico	145
2.5.4 Campo de uma distribuição de dipolos – vetor polarização	147
2.5.5 Cargas de polarização (cargas ligadas)	150
2.5.6 Relação constitutiva e forma final das equações de Maxwell para a eletrostática	155
2.5.7 Tipos de dielétricos	158
A. Dielétricos lineares – susceptibilidade e permissividade elétrica	158
B. Dielétricos anisotrópicos	163
C. Dielétricos não lineares	165
2.6 Energia eletrostática na presença de dielétricos	166
2.6.1 Energia no ponto de vista da fonte do campo	166
2.6.2 Energia no ponto de vista do campo	168
2.7 Condições de contorno	172
Notas e referências bibliográficas	175
Problemas	176
CAPÍTULO 3	
PROBLEMAS DE VALORES DE FRONTEIRA EM ELETROSTÁTICA	183
3.1 Equações de Poisson e Laplace	184
3.2 Solução da equação de Poisson para problemas de alta simetria	185
3.2.1 Carga puntiforme e sua função densidade	185
3.2.2 Distribuições de carga de alta simetria	190
3.3 Teorema da unicidade	193
3.4 PVF governados pela equação de Laplace – alta simetria	198
3.4.1 O conceito de capacitância	199
3.4.2 Energia armazenada no capacitor	204
3.5 Solução da equação de Laplace pelo método da separação de variáveis	205
3.5.1 Separação de variáveis para problemas bidimensionais em coordenadas cartesianas	205
3.5.2 Solução série para problemas bidimensionais em coordenadas cartesianas	215
3.5.3 Separação de variáveis para problemas com simetria longitudinal em coordenadas cilíndricas ...	221
A. Caso 1 – Potencial dependente apenas da variável radial	221
B. Caso 2 – Potencial dependente da variável azimutal	222
C. Caso 3 – Potencial dependente das variáveis radial e azimutal – solução tipo 1	224
D. Caso 4 – Potencial dependente das variáveis radial e azimutal – solução tipo 2	228
3.6 Solução da equação de Poisson – método das imagens	234
3.6.1 O método das imagens	234

3.6.2 Método das imagens para fronteiras planares	236
A. Carga puntiforme na vizinhança de um plano condutor aterrado.	236
B. Solução da equação de Poisson para uma distribuição de cargas na vizinhança do plano condutor.	238
3.6.3 Método das imagens para fronteiras cilíndricas	240
A. Linha de carga na vizinhança de um cilindro condutor mantido a um potencial V	240
B. Capacitância de um par de condutores cilíndricos paralelos.	242
3.6.4 Método das imagens para fronteiras esféricas	245
A. Carga puntiforme na vizinhança de uma esfera condutora aterrada	245
B. Carga puntiforme na vizinhança de uma esfera mantida a um potencial V	248
C. Carga puntiforme na vizinhança de uma esfera condutora carregada com carga Q	249
Notas e referências bibliográficas	251
Problemas.	251
CAPÍTULO 4	
CONDUÇÃO ELÉTRICA	257
4.1 Propriedades de condução em sólidos	257
4.2 Densidade de corrente	259
4.2.1 Corrente elétrica	259
4.2.2 Densidade de corrente	261
4.2.3 Densidade de corrente superficial	263
4.3 Portadores de carga sob a ação de um campo elétrico	265
4.4 Lei de Ohm	268
4.5 Princípio da conservação da carga	272
4.5.1 Formas integral e diferencial do princípio da conservação da carga	272
4.5.2 Relaxação em meio linear, homogêneo e isotrópico	273
4.5.3 Relaxação em condutores com tempos de relaxação distintos.	276
4.5.4 Conexão entre tempo de relaxação, resistência elétrica e capacitância.	280
4.5.5 Condição de contorno para a densidade de corrente	282
4.6 Intercâmbio de energia entre cargas livres e campo elétrico	284
4.7 Problemas de valores de fronteira em meios condutores	287
Notas e referências bibliográficas	294
Problemas.	295
CAPÍTULO 5	
MAGNETOSTÁTICA	301
5.1 Força magnetostática e densidade de fluxo magnético	301

5.2 Potencial vetor magnético	310
5.3 Equações de Maxwell para a magnetostática	320
5.3.1 Forma diferencial	320
5.3.2 Forma integral.....	324
5.4 Determinação de campos com emprego da lei de Ampère	326
5.5 Dipolo magnético	336
5.5.1 Potencial vetor e campo do dipolo magnético	336
5.5.2 Dipolo magnético sob ação de um campo uniforme.....	340
A. Força sobre distribuição localizada de corrente	341
B. Torque sobre dipolo magnético puntiforme	342
C. Energia do dipolo magnético puntiforme	344
5.6 Campo de uma distribuição de dipolos	347
5.6.1 Vetor magnetização	347
5.6.2 Corrente de magnetização.....	348
5.7 Forma final das equações de Maxwell para a magnetostática.....	353
5.7.1 Vetor campo magnético e relação constitutiva.....	353
5.7.2 Condições de contorno	354
5.8 Tipos de meios materiais	357
5.8.1 Meios lineares	357
5.8.2 Meios não lineares	358
5.9 Campos em um meio linear, homogêneo e isotrópico	360
5.10 Solução de problemas de valores de fronteira em magnetostática com a formulação diferencial.....	364
5.10.1 Uso do potencial vetor	364
5.10.2 Potencial escalar magnético.....	371
Notas e referências bibliográficas	377
Problemas	378
CAPÍTULO 6	
LEI DE FARADAY, CORRENTE DE DESLOCAMENTO E AS EQUAÇÕES DE MAXWELL	383
6.1 Lei de Faraday	383
6.2 Energia magnética.....	388
6.3 Indutância	394
6.4 Corrente de deslocamento.....	398
6.5 Equações de Maxwell	400
6.5.1 Formulações diferencial e integral	400
6.5.2 Condições de contorno	403

6.6 Teorema de Poynting	406
6.6.1 Energia eletromagnética em meio, linear, isotrópico e sem perdas	409
6.6.2 Energia eletromagnética em meio, linear, anisotrópico e sem perdas	410
6.6.3 Energia eletromagnética em meio com propriedades arbitrárias	411
Notas e referências bibliográficas	413
Problemas	415
CAPÍTULO 7	
ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	423
7.1 Equação da onda	423
7.2 Solução da equação da onda em coordenadas cartesianas	426
7.3 Onda plana uniforme	429
7.4 Equações de Maxwell para campos harmônicos	432
7.5 Teorema de Poynting para campos harmônicos	437
7.6 Onda plana no regime harmônico	439
7.6.1 Equação de Helmholtz	439
7.6.2 Solução da equação de Helmholtz em coordenadas cartesianas	440
7.6.3 Forma canônica da onda plana uniforme no regime harmônico	443
A. Obtenção do campo elétrico	443
B. Obtenção do campo magnético	445
C. Características da solução para os campos	446
D. Potência e energia	449
7.7 Modelo do oscilador harmônico para a resposta em frequência de meios materiais	451
7.7.1 Modelo do oscilador harmônico	451
A. Equação de movimento para o vetor posição	452
B. Determinação da permissividade elétrica	454
7.7.2 Função permissividade	455
A. Características da função permissividade	456
B. Aproximação lorentziana	457
C. Função permissividade generalizada	458
7.7.3 Função condutividade complexa	459
7.8 Teorema de Poynting no regime harmônico para meio LHI	461
7.8.1 Isolante com permissividade e permeabilidade reais	461
7.8.2 Condutor linear com condutividade, permissividade e permeabilidade reais	462
7.8.3 Condutor linear com condutividade real e com permissividade e permeabilidade complexas	462
7.9 Propagação eletromagnética em meio LHI	463
7.9.1 Propagação em meio LHI sem perdas	465
7.9.2 Propagação em meio LHI com perdas	469

7.9.3 Propagação em meio LHI dispersivo	471
A. Espectro de Fourier de um sinal modulado	472
B. Propriedades espectrais de um sinal real	474
C. Paridade da constante de fase e do índice de refração	475
D. Obtenção do sinal de saída – velocidade de fase e velocidade de grupo	476
7.10 Espectro eletromagnético	480
7.10.1 Ondas de rádio	480
7.10.2 Micro-ondas e ondas milimétricas	480
7.10.3 Infravermelho e visível	481
7.10.4 Ultravioleta e raios X	481
Notas e referências bibliográficas	482
Problemas	483
CAPÍTULO 8	
REFLEXÃO E REFRAÇÃO	487
8.1 Reflexão e refração em uma interface simples entre meios sem perdas	488
8.1.1 Considerações iniciais	488
8.1.2 Reflexão especular e lei de Snell da refração	489
8.1.3 Metodologia de expressão dos campos	491
A. Ondas TE (s)	492
B. Ondas TM (p)	492
8.1.4 Coeficientes de reflexão e transmissão para ondas p (ondas TM)	493
8.1.5 Coeficientes de reflexão e transmissão para ondas s (ondas TE)	495
8.1.6 Expressões gerais em função das impedâncias e admitâncias de onda	497
8.1.7 Expressões restritas a meios não magnéticos	498
8.1.8 Expressões restritas ao caso de incidência normal	499
8.1.9 Sumário das expressões para os coeficientes de reflexão e transmissão	500
8.2 Reflectância e transmitância – meios sem perdas	501
8.2.1 Conservação da potência eletromagnética	501
8.2.2 Reflectância e transmitância	504
A. Expressões gerais para o vetor de Poynting	504
B. Reflectância e transmitância para ondas TM (p) em interface entre meios sem perdas	505
C. Reflectância e transmitância para ondas TE (s) em interface entre meios sem perdas	506
8.3 Reflexão interna total e ângulo de Brewster	507
8.3.1 Reflexão interna total	507
8.3.2 Transmissão total – ângulo de Brewster	510
8.4 Reflectância, transmitância e absorvância para interface entre um meio transparente e um meio absorvedor	511
8.4.1 Relação entre vetor de onda e vetores de campo em um meio absorvedor	511
8.4.2. Expressões complementares para o vetor de Poynting	514

8.4.3 Parâmetros geométricos na reflexão e na refração para interface entre meio transparente e meio absorvedor	514
A. Componente longitudinal do vetor de onda no meio absorvedor	514
B. Ângulo crítico no regime de reflexão total atenuada	516
C. Lei de Snell generalizada	517
8.4.4 Balanço de potência para interface entre um meio transparente e um meio absorvedor	518
A. Reflectância, transmitância e absortância.	518
B. Expressões para a reflectância, transmitância e absortância	521
8.4.5 Reflexão total atenuada e ângulo de Brewster na interface entre meio transparente e meio absorvedor	522
A. Reflexão total atenuada	522
B. Ângulo de Brewster	523
8.5 Reflexão para incidência frontal em um meio condutor.	524
8.5.1 Determinação dos campos dentro e fora do condutor	525
8.5.2 Profundidade de penetração e resistência de folha	529
A. Profundidade de penetração (profundidade pelicular)	529
B. Resistência de folha	530
Notas e referências bibliográficas	533
Problemas.	535
CAPÍTULO 9	
LINHAS DE TRANSMISSÃO	539
9.1 Modo TEM em linhas de transmissão sem perdas.	540
9.1.1 Método formal de determinação de campos em linhas de transmissão	540
9.1.2 Grandezas representativas de linhas de transmissão	544
A. Tensão e corrente	544
B. Capacitância por unidade de comprimento da linha de transmissão.	545
C. Indutância por unidade de comprimento	546
D. Impedância característica	547
E. Velocidade de fase	548
F. Fluxo de potência	549
9.2 Linhas de transmissão com perdas.	551
9.2.1 Perdas por condução	551
A. Cálculo da potência dissipada por unidade de comprimento.	551
B. Cálculo da constante de atenuação	555
9.2.2 Perdas no meio de preenchimento	557
9.2.3 Obtenção da atenuação diretamente do teorema de Poynting	558
9.3 Modelagem de linhas de transmissão por parâmetros distribuídos	562
9.3.1 Circuito equivalente de um trecho longitudinal diferencial de uma linha de transmissão	562
9.3.2 Equações diferenciais para tensão e corrente na linha de transmissão.	563
9.3.3 Solução no regime harmônico	564

9.4 Análise de linhas de transmissão sem perdas no regime harmônico	566
9.4.1 Soluções para V e I	566
9.4.2 Linha de transmissão terminada em uma carga	567
A. Coeficiente de reflexão	567
B. Impedância de entrada	568
9.4.3 Características da função impedância e do coeficiente de reflexão.....	570
A. Impedância e admitância normalizadas	570
B. Coeficiente de reflexão.....	570
C. Tensão e corrente ao longo da linha	571
9.5 A carta de Smith	575
9.5.1 O plano complexo Γ	575
9.5.2 Curvas de resistência constante	576
9.5.3 Curvas de reatância constante	577
9.6 Transformação e casamento de impedâncias com a carta de Smith.....	580
9.6.1 O aplicativo <i>SmartSmith</i>	580
9.6.2 Exemplos com o emprego do aplicativo <i>SmartSmith</i>	581
9.6.3 Propriedades adicionais da carta de Smith.....	588
A. Carga casada	588
B. Curto-circuito	589
C. Circuito aberto	590
D. Uso da carta de Smith como carta de admitâncias	591
9.6.4 Casamento de impedâncias com estube simples	592
Notas e referências bibliográficas	595
Problemas.....	596

CAPÍTULO 10

GUIAS DE ONDA	601
10.1 Modos eletromagnéticos em guias de onda	602
10.1.1 Natureza da solução em guias metálicos ou dielétricos	602
10.1.2 Método formal de obtenção de modos em guias de onda.....	603
10.1.3 Classificação dos modos.....	606
A. Modo TEM	606
B. Modos TE	606
C. Modos TM.....	608
10.1.4 Fluxo de potência e frequência de corte.....	609
10.2 Guia de onda retangular.....	616
10.2.1 Solução para os modos TE.....	616
A. Solução geral para H_z	616
B. Condições de contorno	618
C. Parâmetros característicos dos modos TE_{mn}	620
D. Campos do modo TE_{mn}	621

10.2.2 Ortogonalidade dos modos	623
10.2.3 Distribuição de potência entre modos TE	624
10.2.4 Solução para os modos TM	626
10.3 Atenuação devida à condutividade finita das paredes do guia	628
10.3.1 Formulação para o caso de pequenas perdas	628
10.3.2 Constante de atenuação para modos TE	631
10.3.3 Constante de atenuação para modos TM	633
10.4 Características dos modos em um guia de onda retangular	635
10.4.1 Densidade de potência	635
10.4.2 Modos como superposição de ondas planas	637
A. Modos TE	637
B. Modos TM	641
10.4.3 Modo fundamental no guia de onda retangular	642
10.4.4 Dispersão de guia de onda, velocidade de fase e velocidade de grupo	645
Notas e referências bibliográficas	648
Problemas	650
 CAPÍTULO II	
RADIAÇÃO E ANTENAS: PRINCÍPIOS BÁSICOS	
11.1 Potenciais eletromagnéticos	654
11.2 Equações diferenciais para os potenciais eletromagnéticos	655
11.3 Potenciais eletromagnéticos na condição de Lorentz	657
11.3.1 Solução para uma fonte puntiforme	657
11.3.2 Solução para cargas e correntes distribuídas	661
11.4 Radiação produzida por um dipolo elétrico	663
11.5 Potenciais e campos no regime harmônico	673
11.6 Método formal de determinação de campos de radiação	680
11.7 Antena dipolo	684
11.8 Parâmetros característicos de antenas	689
11.8.1 Intensidade de radiação	689
11.8.2 Resistência de radiação	689
11.8.3 Diretividade	689
11.8.4 Ganho absoluto de uma antena	690
11.8.5 Ganho relativo de uma antena	690
Notas e referências bibliográficas	690
Problemas	692

CAPÍTULO 12

RESSOADORES ELETROMAGNÉTICOS	695
12.1 Análise de circuitos ressonantes no regime transitório	695
12.1.1 Circuitos ressonantes RLC série e paralelo.	696
12.1.2 Solução geral para o circuito ressonante	699
12.1.3 Respostas do circuito ressonante perante estímulos específicos.	700
A. Aplicação de um estímulo senoidal no tempo.	701
B. Resposta após desligamento do estímulo senoidal	703
12.1.4 Dissipação e energia	708
12.2 Análise de circuitos ressonantes no regime permanente.	712
12.2.1 Função de transferência no regime permanente.	712
12.2.2 Função de transferência na região em torno da condição de ressonância	713
12.2.3 Conexão entre potência, energia e resposta em frequência	715
12.2.4 Fator de qualidade	718
12.3 Ressonadores em linhas de transmissão.	720
12.4 Cavidades eletromagnéticas.	729
12.4.1 Solução para os modos TE_{mnl} em uma cavidade retangular	730
A. Frequências de ressonância	730
B. Distribuição de campos.	731
12.4.2 Solução para os modos TM_{mnl} na cavidade retangular	733
12.4.3 Fator de qualidade	734
A. Modos TE	734
B. Modos TM.	737
12.4.4 Ganho de amplitude de campo em uma cavidade.	741
Notas e referências bibliográficas	744
Problemas.	745
ÍNDICE REMISSIVO.	749

Prefácio

Ao escrever o prefácio de um livro, o relator precisa conhecer detalhes da obra, e não apenas aquilo que está impresso em uma brochura bem cuidada.

Esse é o meu caso com relação ao livro *Tratado de eletromagnetismo*, pois acompanho há décadas o trabalho desenvolvido pelo professor Eduardo Fontana, apesar da distância que nos separa.

Tratado de eletromagnetismo não é apenas um livro, e sim parte de um grande projeto educacional que se desenrola há 30 anos e que culmina nesta obra.

Vários atores participaram desse projeto. Refiro-me a seus alunos, que foram partícipes desde a primeira etapa dos trabalhos. Os inúmeros objetos educacionais preparados por Fontana passaram pelo escrutínio desse grupo, que é o mais exigente da avaliação acadêmica.

Procurando sempre conectar seu projeto às novas tendências da educação em engenharia contemporânea, o autor produziu um elenco de videoaulas, abrigado no YouTube, que se tornou referência nos cursos de graduação e pós-graduação em engenharia elétrica não só na Universidade Federal de Pernambuco, mas também em outras universidades públicas e privadas do país.

Este insumo é de fundamental importância para os professores que praticam metodologias ativas de aprendizagem, nas quais os alunos são partícipes na busca do conhecimento, liberando-os para agir como mentores e orientadores na busca da trilha adequada para chegar ao objetivo maior, que é aquisição do conhecimento, e não apenas sua memorização.

A disponibilidade de aplicativos, como o *SmartSmith*, acelera o aprendizado, na medida em que dispensa a prática do traçado com compassos, característica da carta de Smith, transferindo essa tediosa tarefa para o computador e liberando o estudante para criar novas explorações sobre as facilidades que essa ferramenta disponibiliza.

Tratado de eletromagnetismo mostra aplicações do eletromagnetismo na engenharia e, com isso, quebra o estigma dessa disciplina, frequentemente rotulada como essencialmente teórica e limitada no objetivo de conectar o estudante de engenharia com a profissão.

Chama atenção do leitor a leitura da apresentação, cujo relato tem início com a exibição da estratégia a ser adotada para escrever uma obra de referência em eletromagnetismo, muito útil para quem tem projeto semelhante. No caso do professor Eduardo Fontana, a trajetória do *Tratado de eletromagnetismo* teve início em 1990. Foram 30 anos pensando em como apresentar determinado assunto, produzir figuras claras com ferramentas modernas de modelamento 3D e gerar material de apoio ao professor.

A distribuição do conteúdo em 12 capítulos acompanha a evolução da disciplina ao longo dos tempos. O estudante viajará com o autor da pré-história do eletromagnetismo aos dias atuais, nos quais essa área adquire importância estratégica nas comunicações, na geração, na transmissão e na distribuição da energia elétrica como nenhuma outra disciplina dos cursos de engenharia elétrica.

No cenário atual da educação em engenharia, destaca-se o papel das competências que deverão ser agregadas ao egresso após a conclusão do curso. Essas competências começam, sem dúvida, pelas de natureza tecnológica, as quais exigem sólida formação básica para o engenheiro, que o capacita a enfrentar qualquer desafio profissional no futuro.

Tratado de eletromagnetismo cumpre esse papel com rara maestria, e desde a apresentação essas competências se explicitam. A relação de competências elencada é extremamente rica, e a postura do autor é inovadora ao destacá-las e ao convidar o leitor, após seguir a trilha, a revisitar sua apresentação para um *checklist*. Adquirir essas competências, afirmo com consciência, tornará o estudante um melhor engenheiro.

Este livro tem também a virtude de ter sido escrito por um artista, aficionado por *rock* de boa qualidade, que pratica com sua banda. Mas não foi esse o talento que Eduardo Fontana utilizou para a grande tarefa de sua vida.

Em vez de reproduzir em seu livro o conteúdo escrito por outros autores, Fontana se comporta tal como um arquiteto, concebendo a cidade do eletromagnetismo. Essa cidade é detalhada com suas grandes avenidas, seus monumentos e seus marcos históricos, itens suficientes para dar ao leitor condições de se orientar nesse grande universo que é o eletromagnetismo.

No entanto, para aqueles pesquisadores que buscam maiores detalhes, os principais deles estão contidos no texto, em quantidades suficientes para dar diretrizes seguras em pesquisas complexas e originais. Seu conteúdo bem desenvolvido pode, inclusive, ser visto pela ótica de um grande planejador urbano. Eduardo Fontana trabalhou como um Lúcio Costa planejando sua Brasília, construção que, após concluída, encheu de orgulho um povo. Foi o que senti ao ler o *Tratado de eletromagnetismo*.

José Roberto Cardoso
Escola Politécnica da USP