

# Prefácio

Atualmente, o *Eletromagnetismo* faz parte de nossa vida diária de uma forma como nunca antes ocorreu, e não estou falando aqui das interações entre os átomos que constituem nossos corpos, ou então das complexas reações bioquímicas responsáveis pela manutenção da vida. Estou falando da enorme quantidade de equipamentos, dispositivos e instrumentos elétricos e eletrônicos que fazem parte da rotina do dia a dia da maioria das pessoas. Objetos como televisores, telefones celulares, tocadores de música portáteis e computadores são extremamente comuns hoje, e todos estão relacionados diretamente ao uso prático de fundamentos de Eletromagnetismo. Isso ocorre também com automóveis, em geral, em que uma grande parte dos sistemas de controle deixou de ser mecânico e já funciona eletronicamente, passa por equipamentos “inocentes”, como cafeteiras elétricas, chegando aos transmissores *wireless* das redes de livre acesso à *internet* presentes em vários locais públicos. Entretanto, apesar desse enorme uso, feito indiscriminadamente e inadvertidamente pelas mais diversas pessoas, o Eletromagnetismo ainda é um tópico dominado por relativamente poucas pessoas, mesmo em se tratando de pessoas ligadas à área científica, em particular à Física. Isso se deve, no meu entender das coisas, a dois pontos principais. Primeiro, há uma complexidade matemática inerente ao assunto, em especial no que se refere às relações vetoriais que existem entre as grandezas relevantes. Segundo, é necessária uma certa capacidade de abstração quando se estuda Eletromagnetismo, pois grandezas como campos elétricos e magnéticos não são “visíveis” e “acessíveis” do mesmo modo como ocorre com sistemas puramente mecânicos, em que a interação entre as pessoas e esses sistemas mecânicos é muito mais direta. É preciso imaginar campos elétricos e magnéticos, potenciais elétricos, densidades superficiais de carga, etc., mas dificilmente se consegue efetivamente visualizar essas grandezas. Estes dois efeitos combinados geram um certo desconforto nos alunos, principalmente no primeiro contato que eles têm com fenômenos e fundamentações teóricas básicas associadas ao Eletromagnetismo, tanto em cursos de nível médio como na universidade.

Nos níveis mais aprofundados, a teoria do Eletromagnetismo envolve uma fundamentação matemática que, em geral, não é suficientemente explicada, o que, via de regra, acaba prejudicando o aprendizado. Assim, decidi apresentar o Eletromagnetismo em detalhes, tanto do ponto de vista físico como da perspectiva matemática, fazendo as demonstrações matemáticas e discutindo as considerações físicas necessárias para a resolução de problemas, com rigor e clareza. Somado a isso, apresento um grande número de exemplos resolvidos, para esclarecer, fixar e complementar a teoria. Esses exemplos não devem ser vistos como meros exercícios, porque é justamente neles que boa parte da teoria é discutida, como meio de estimular o aluno a verificar o desenvolvimento da resolução de um problema, criar o hábito de fazer considerações físicas acerca dele, testar e ampliar sua intuição física e suas habilidades matemáticas, descobrir se as hipóteses por ele formuladas são verdadeiras ou falsas e, finalmente, investigar os motivos que levaram a um ou outro resultado.

O livro foi formulado para atender às seguintes disciplinas: o curso básico de Eletromagnetismo ministrado em Física Básica (ou Geral), cuja duração é de, normalmente, um semestre, no segundo ano da graduação em Física e Engenharias, em que os conceitos físicos fundamentais referentes à matéria são apresentados e discutidos; o curso de Teoria Eletromagnética, ou equivalente, com duração de um ano, em geral no terceiro ou quarto ano de curso de graduação, em que o formalismo matemático é refinado e ampliado; e, por fim, o curso de Eletromagnetismo da pós-graduação, com duração entre um e dois semestres, em que são apresentados novos fenômenos físicos envolvendo uma teoria matemática bem mais complexa do que aquela vista na graduação. Portanto, ele atende aos três níveis de estudo do Eletromagnetismo para alunos de Física, o que é interessante, porque alunos que estão iniciando os estudos de Eletromagnetismo podem ter a curiosidade de saber como problemas mais complicados são resolvidos, assim como alunos dos níveis mais altos podem sentir a necessidade de recordar conceitos físicos estudados anteriormente.

Não foi possível concentrar o texto em um único volume, porque o assunto é bastante amplo. Este volume se dedica apenas à Eletrostática, cuja compreensão é decisiva para o estudo das outras divisões e fenômenos relacionados ao Eletromagnetismo. Sem uma fundamentação sólida em Eletrostática, a investigação dos efeitos magnéticos fica prejudicada, o que certamente acarretará problemas quando reunirmos os fenômenos elétricos e magnéticos e apresentarmos os fenômenos eletromagnéticos propriamente ditos. Por causa disso, procurei dar uma atenção especial à Eletrostática, explicando detalhadamente vários tópicos importantes que são, em geral, vistos mais rapidamente do que deveriam. Por outro lado, procurei ilustrar fartamente todos os assuntos, já que uma imagem esclarece tanto ou mais do que várias linhas de texto explicativo. Cada capítulo culmina com uma série de exercícios. Procurei fazê-los interessantes e abrangentes, e em pequeno número, para não cansar. Creio que isso possa estimular o hábito saudável da consulta de mais de um livro.

A utilização de diferentes livros é muito importante, já que nenhum é perfeito, e o aluno deve aprender a aproveitar o que cada um tem de melhor a oferecer.

Para poder reunir temas complexos como funções de Green com fenômenos básicos de Eletromagnetismo como os processos de eletrização, tive que dividir o texto em capítulos, seções, etc., relativamente independentes uns dos outros. É claro que essa divisão não pode ser perfeita, mas creio ter conseguido um bom resultado. Além disso, em última análise, cabe ao professor de cada disciplina escolher os assuntos que irá abordar com os seus alunos, de acordo com as peculiaridades de cada currículo em particular.

Os três primeiros capítulos são uma introdução importante para a maioria dos desenvolvimentos feitos ao longo do texto. O capítulo 1 discute os conceitos de vetor, sistemas de coordenadas, grandezas escalares e vetoriais, bem como alguns teoremas de cálculo vetorial. Acredito que este capítulo, como um todo, é importante para as disciplinas relacionadas ao Eletromagnetismo, nos três níveis de aprofundamento, e mesmo para outras disciplinas de Física, como Mecânica Clássica e Mecânica Quântica, por exemplo. Em particular, os sistemas de coordenadas retangulares, polares, cilíndricas e esféricas, abordados nas seções 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5, respectivamente, são extremamente úteis no estudo de vários assuntos. O capítulo 2 trata das séries de Taylor, na seção 2.1, das séries de Fourier, na seção 2.2, e da série geométrica, na seção 2.3. Este capítulo pode ser estudado, por inteiro, por alunos de qualquer nível, e ele também é útil para alunos de outras disciplinas de Física. O capítulo 3 apresenta um desenvolvimento relativo às funções delta de Dirac, utilizadas em vários momentos ao longo do texto, as quais também são importantes em outras disciplinas.

O capítulo 4 apresenta os conceitos de carga elétrica e processos de eletrização, nas seções 4.1 e 4.2. Ele é voltado principalmente aos alunos de Física Básica. A seção 4.3 trata da força elétrica. Sugiro que todos a leiam, em algum momento, porque nela são discutidos alguns aspectos físicos importantes que são muitas vezes deixados de lado. Por fim, a seção 4.4 ensina como construir um pêndulo eletrostático e um eletroscópio. Isso pode ser útil para aqueles que cursam Licenciatura em Física, porque permite a realização de algumas experiências qualitativas em sala de aula, e também para os que, como eu, gostam de reunir a teoria e alguns procedimentos experimentais.

No capítulo 5, passamos à investigação do campo elétrico, apresentando os conceitos fundamentais necessários. Este capítulo é indicado para estudantes de Física Básica, com exceção, talvez, das seções 5.3 e 5.7, que envolvem conceitos matemáticos mais aprofundados. Para os alunos de Física Básica, a unidade mais importante do capítulo 5 é a seção 5.2, que discute fisicamente uma argumentação que leva à obtenção da lei de Gauss. Também sugiro que façam as experiências qualitativas apresentadas na seção 5.9, o que certamente facilitará o estendimento do

fenômeno da blindagem elétrica. E para os outros estudantes, não existem restrições com relação aos temas abordados neste capítulo.

Os conceitos fundamentais referentes ao potencial elétrico são vistos no capítulo 6, que é mais voltado para alunos de Física Básica e Teoria Eletromagnética do que para estudantes de pós-graduação. Este capítulo introduz a energia eletrostática, na seção 6.1, define o potencial eletrostático, na seção 6.2, e investiga dipolos elétricos, na seção 6.3. São também estabelecidas as condições de continuidade para campo e potencial elétrico numa interface que não envolve dielétricos, na seção 6.4. Há também algumas experiências relativas a geradores de Van de Graaff, na seção 6.6.

O capítulo 7 trata da equação de Laplace, assunto que não é usual para alunos de Física Básica. De fato, esta unidade pode ser eliminada por completo para esses alunos, sem perda de continuidade, com exceção das experiências apresentadas na seção 7.6, que são interessantes para eles. O capítulo é voltado a alunos de Teoria Eletromagnética e também a alunos de Eletromagnetismo de pós-graduação. Para estudantes de Teoria Eletromagnética, sugiro excluir as seções 7.4.2 e 7.5.2, por causa da matemática envolvida. Já os alunos de pós-graduação devem estudar o capítulo 7 por inteiro.

O método das imagens é visto no capítulo 8. O assunto não é usual para alunos de Física Básica, mas ele deve ser estudado pelos alunos que cursam disciplinas mais avançadas, sem restrições. O mesmo vale para o capítulo 9, que trata da expansão do potencial elétrico em multipolos (seção 9.1) e da energia potencial em multipolos (seção 9.2). Alunos de Física Básica geralmente não veem estes assuntos.

As funções de Green para o potencial elétrico na Eletrostática são abordadas no capítulo 10. Por causa de sua complexidade matemática, este assunto é recomendado somente para alunos de pós-graduação que estão cursando a disciplina Eletromagnetismo. Ele não é indicado para alunos de Teoria Eletromagnética e é fortemente contraindicado para quem está cursando Física Básica.

O capítulo 11 trata do campo elétrico dentro de um material dielétrico. Algumas partes podem e devem ser estudadas pelos alunos de Física Básica, em particular a seção 11.1, que discute qualitativamente os fenômenos físicos que ocorrem dentro de um dielétrico quando um campo elétrico externo é aplicado a ele. As discussões quantitativas devem ser deixadas para alunos mais avançados.

Finalmente, o capítulo 12 estuda os capacitores. Ele é dirigido a alunos de Física Básica, embora alguns tópicos, como a seção 12.4, sejam indicados para estudos mais avançados. A seção 12.5 apresenta a garrafa de Leyden, primeiro capacitor, bem como a experiência da gota de óleo de Millikan, primeira a medir a carga do elétron. Esta seção, por razões históricas, é leitura obrigatória para alunos de Física Básica.

Existem ainda quatro apêndices neste volume. O apêndice A apresenta algu-

mas constantes físicas relevantes para o dia a dia. O apêndice B detalha a dedução do operador  $\nabla$ , do gradiente, do divergente, do rotacional, do operador  $\nabla^2$  e do Laplaciano em coordenadas retangulares, cilíndricas e esféricas. Por fim, os apêndices C e D, que complementam o capítulo 7, apresentam a resolução das equações diferenciais de Legendre e de Bessel e mostram os polinômios de Legendre, os polinômios generalizados de Legendre, os harmônicos esféricos, a série de Legendre, a série dos harmônicos esféricos e a série de Fourier-Bessel.

Espero que o livro contribua para uma desmistificação do Eletromagnetismo, produzindo uma melhor compreensão dos fenômenos físicos, que ele responda a possíveis perguntas e dúvidas e, principalmente, que estimule a formulação de novas, despertando a curiosidade pela pesquisa, tanto teórica quanto experimental. Parabenizo a Todapalavra Editora pelo excelente trabalho editorial realizado e solicito que sugestões, críticas e comentários sejam enviados a ela ou diretamente a mim.

Por fim, gostaria de dedicar este volume ao meu querido pai.

*Kleber Daum Machado*  
*Departamento de Física*  
*Universidade Federal do Paraná*  
*kleber@fisica.ufpr.br*  
*<http://fisica.ufpr.br/kleber>*  
*29 de agosto de 2012*