

PREFÁCIO

A presente obra destina-se fundamentalmente a constituir o texto base de apoio à lecionação das disciplinas de *Simulação dos Campos em Electrotecnia* do DEAEEC (Diploma de Estudos Avançados em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) e da disciplina de *Métodos Computacionais em Electromagnetismo* do DEAEEC (Diploma de Estudos Avançados em Engenharia Computacional), ambas do IST (Instituto Superior Técnico). Estes diplomas avançados inserem-se nos Programas Doutorais em Engenharia Electrotécnica e de Computadores e em Engenharia Computacional, respetivamente. Este último programa de doutoramento, em “Engenharia Computacional”, inclui-se no contexto das três áreas temáticas do Acordo Portugal — University of Texas at Austin, denominado *Advanced Computing/Computational Sciences and Applications* que “visa desenvolver um novo paradigma multidisciplinar de formação em engenharia e ciências computacionais, associando uma qualidade elevada de investigação a programas curriculares inovadores”.

O cálculo do campo eletromagnético tem tido cada vez maior importância na simulação, dimensionamento, projeto e otimização dos dispositivos da Engenharia Eletrotécnica. O desenvolvimento da tecnologia dos materiais, a adoção de configurações não tradicionais, a diminuição das dimensões e dos custos acompanhados do aumento dos níveis energéticos e da rapidez de transmissão tem levado ao desenvolvimento de técnicas de computação cada vez mais rigorosas.

O objetivo das referidas disciplinas é o domínio dos métodos, numéricos e analíticos, de cálculo do campo eletromagnético com aplicação nos dispositivos da Engenharia Eletrotécnica, nomeadamente em linhas de transmissão de energia, transformadores e máquinas elétricas (no âmbito dos sistemas de energia elétrica); linhas de transmissão de sinal, guias de onda das micro-ondas e óticos, antenas (no âmbito dos sistemas de telecomunicações); simulação das propriedades eletromagnéticas dos materiais; ensaios não destrutivos para

deteção de defeitos (deteção de heterogeneidades); e problemas de compatibilidade eletromagnética e de mitigação dos campos elétrico e magnético.

Os potenciais interessados na presente obra são, para além dos alunos que diretamente frequentam as referidas disciplinas, todos aqueles, principalmente os graduados, mestres e doutorados em Engenharia, em particular em Engenharia Eletrotécnica, que pretendam ou estejam a desenvolver *software* para a simulação do campo eletromagnético, ou que, não estando diretamente a desenvolver este tipo de *software*, sejam ou venham a ser utilizadores de programas comerciais de simulação do campo eletromagnético. Qualquer que seja o programa comercial escolhido, uma forte interligação e interferência do utilizador é exigida, quer na geração dos dados que implica a definição da geometria, das propriedades dos meios envolvidos e na definição das fontes do campo, quer na imposição das condições de fronteira e iniciais do problema e das discretizações a adotar. É exigido ao utilizador destes programas um grau de especialização acentuado. Esta obra visa contribuir para esse grau de especialização, através da compreensão dos métodos mais frequentemente utilizados, dos critérios que devem ser adotados para a definição das condições de fronteira e iniciais dos problemas de campo, como também dos critérios para o estabelecimento das discretizações ótimas sob o ponto de vista da precisão dos resultados.

Um outro aspeto a referir no presente prefácio diz respeito à escolha da língua. Na fase de projeto da presente obra houve uma hesitação entre as línguas portuguesa e inglesa. Pode parecer que a língua inglesa permitiria estender a todo o mundo o universo de interessados. Todavia, o elevado número de obras em língua inglesa dedicadas a este tema já existentes e publicadas leva à forte diminuição do número de potenciais interessados por obra. Por outro lado, em língua portuguesa existe um número diminuto de obras sobre este tema. Atrever-me-ia mesmo a constatar que a presente obra é única em língua portuguesa, tendo em conta a perspetiva adotada. Lembrando que o universo da língua portuguesa é extenso, que é a quarta língua europeia mais falada no mundo, que existem países de língua portuguesa em rápido desenvolvimento, então é possível concluir, embora possa não parecer, que os potenciais interessados poderão ser em maior número com a escolha da língua portuguesa na perspetiva, ainda, de esse número vir a aumentar fortemente com o alargamento da escolaridade de nível superior e universitário expetável no conjunto de países de língua portuguesa.

O ponto de partida da presente obra são as equações fundamentais do campo eletromagnético — as equações de Maxwell —, cuja revisão se apresenta no Capítulo 1.

Ainda, na perspectiva de uma revisão, junta-se no final da obra o Anexo — Revisão do Formalismo Matemático. Esta revisão é, no Anexo, referente ao Cálculo Vetorial e Diferencial, com a listagem das principais identidades deste cálculo, e ao Cálculo Vetorial e Integral, com a revisão dos teoremas de Stokes, de Gauss-Ostrogradski e de Green. O Anexo termina com uma revisão de estruturas algébricas, nomeadamente de espaços funcionais, com especial ênfase para o espaço funcional de Hilbert.

No Capítulo 2, é feita a caracterização destas equações no contexto das equações diferenciais às derivadas parciais, e, em consequência, são concluídas as condições necessárias e suficientes para a unicidade de solução dessas equações, isto é, são discutidas quais as necessárias e suficientes condições de fronteira e iniciais para que cada problema de campo eletromagnético tenha solução e seja única.

Em ligação com esta caracterização, apresentam-se três tipos de formulações dos problemas de campo — a formulação diferencial que decorre diretamente das equações de Maxwell, as formulações integrais decorrentes da aplicação dos teoremas de Green, e a formulação variacional apresentada por analogia com a formulação de Hamilton no contexto da Mecânica.

Usa-se a formulação diferencial e integral para a introdução dos métodos analíticos, a partir da primeira, principalmente por adoção do método de separação de variáveis e, a partir da formulação integral, por adoção das apropriadas funções de Green, isto é, das soluções de fontes pontuais.

Por outro lado, estas formulações constituem ainda a base para a resolução de problemas de campo por aplicação de métodos numéricos. Os métodos mais usados são introduzidos, nomeadamente o método dos resíduos pesados, o método dos momentos, o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos, o método dos elementos de fronteira, os métodos híbridos, e, finalmente, termina-se com uma referência, no Capítulo 10, ao método das diferenças finitas no domínio do tempo para o tratamento de problemas de radiação eletromagnética.

O primeiro conjunto de capítulos — Capítulos 3 a 6 — trata de campos escalares, com especial enfoque no cálculo de potenciais escalares. As equações tomadas são do tipo das equações diferenciais elípticas — equações de Laplace, de Poisson e de Helmholtz — que permitem resolver problemas desde o campo elétrico estático, do campo elétrico das correntes estacionárias e do campo magnético em problemas 2D, quer estático quer variável,

no domínio da frequência, em meios condutores, até problemas de propagação guiada no domínio da frequência. As aplicações apresentadas estão, todavia, principalmente, no contexto dos problemas do campo elétrico estático. No Capítulo 3 faz-se uma introdução aos métodos analíticos; no Capítulo 4 introduzem-se os principais conceitos associados aos métodos numéricos; o método dos elementos finitos é introduzido no Capítulo 5, e o método dos elementos de fronteira e os métodos híbridos são introduzidos no Capítulo 6.

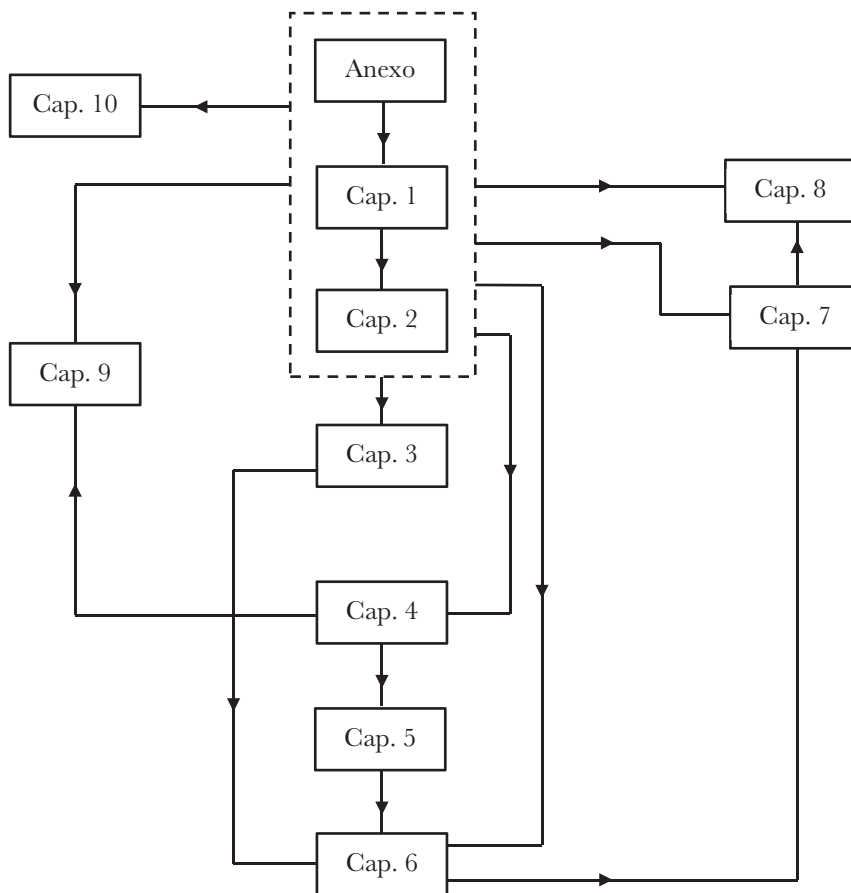


Fig. P.1 Diagrama de blocos com indicação das ligações e incidências entre os vários capítulos da obra. A tracejado, indica-se o bloco de introdução e de revisão.

Os Capítulos 7, 8 e 10 tratam de campos vectoriais. O Capítulo 7 aborda os problemas do campo magnético estático, resolvidos com uso do potencial vetor, com inclusão ainda dos problemas não lineares decorrentes da presença de meios ferromagnéticos. O Capí-

tulo 8 aborda os problemas da penetração do campo eletromagnético variável no tempo em meios condutores no contexto, agora, das equações diferenciais parabólicas — equações de difusão — com separação das integrações no espaço e no tempo e, ainda, também, com referência aos problemas não lineares. O Capítulo 10, já mencionado, trata de problemas da radiação eletromagnética no contexto das equações diferenciais hiperbólicas — equações de onda —, onde para as integrações no espaço e no tempo são adotados esquemas de diferenças finitas como aproximações de operadores diferenciais de 1.^a ordem que atuam diretamente sobre as grandezas do próprio campo eletromagnético.

O Capítulo 9 trata do problema da determinação dos valores próprios de equações homogêneas com aplicação à determinação dos modos de propagação guiada em guias de onda.

Apresenta-se na Fig. P.1 um diagrama de blocos com a indicação das principais ligações e incidências entre os vários capítulos da obra. Existe um bloco constituído pelo Anexo (disposto no final da obra) e pelos Capítulos 1 e 2, indicado a tracejado, que constitui o ponto de partida ou a introdução para todos os outros capítulos, contendo as revisões pertinentes. A sequência formada pelos Capítulos 4 a 8, onde se abordam os métodos numéricos inerentes à resolução das equações elípticas e parabólicas às derivadas parciais, antecedido pelo Capítulo 3, onde se abordam os métodos analíticos de resolução de equações elípticas, constitui o corpo principal da obra. Os Capítulos 9 e 10 podem ser considerados independentes desta sequência, embora sejam, tal como os outros, suportados nos conceitos fundamentais contidos no bloco introdutório.

A descrição feita nos parágrafos precedentes permite concluir que os leitores, e, em particular, os alunos das disciplinas alvo, devem ter conhecimentos adquiridos em Eletromagnetismo Aplicado, e também nas matérias de Álgebra (estruturas algébricas, álgebra dos complexos e álgebra das matrizes), das Funções Complexas de Variável Complexa, do Cálculo Diferencial e Vetorial e das Equações Diferenciais.

O ponto de vista da obra é, portanto, a apresentação dos métodos de cálculo em problemas do campo eletromagnético com vista à simulação, projeto e otimização de dispositivos da Engenharia Eletrotécnica. Esta apresentação consiste no estabelecimento das equações fundamentais, acompanhado das demonstrações matemáticas pertinentes, e estende-se até à concretização dos algoritmos. Embora sempre com a preocupação de rigor, na perspectiva de uma pós-graduação, procura-se frequentemente ilustrar os conceitos, por vezes abstratos, com uma interpretação física ilustrativa de problemas de campo concretos. Por exemplo, nos capítulos onde o campo primário (campo obtido como resultado direto da

aplicação de um determinado método) é um campo escalar (Capítulos 2 a 6) são frequentemente usados exemplos do campo elétrico estático para a ilustração e interpretação física dos dados, por um lado, e dos resultados, por outro. A concretização dos conceitos abstratos com recurso a objetos da física vai, nalguns casos, mesmo ao ponto de ser usada como complemento das demonstrações matemáticas, simplificando-as sob o ponto formal, mas com a necessária sustentação no rigor.

O desenvolvimento dos algoritmos respeitantes aos diversos métodos insere-se no âmbito e ponto de vista da presente obra. Refira-se, por exemplo, o algoritmo apresentado no caso particular do método dos elementos finitos abordado no Capítulo 5. Esta concretização não significa a sua implementação. A implementação dos algoritmos é deixada como exercício para os leitores, pelo que a linguagem de programação não constitui um aspeto essencial e, portanto, é escassamente referida ou sugerida ao longo da obra.

O presente livro é, assim, um texto pedagógico. Neste enquadramento, são apresentados frequentemente exercícios, problemas, sugestões de reflexão para serem executados pelos leitores. Procurou-se, em todos os casos, indicar-se uma possível solução, nuns casos, com apresentação de uma sequência de pistas em notas de fim de página; noutros casos, com descrição mais pormenorizada da proposta de solução, em apêndices no final do respetivo capítulo. Em qualquer caso, deve deixar-se inteiramente à iniciativa do leitor a investigação do caminho para a solução de cada exercício sugerido. Estes exercícios e problemas não estão, todavia, apresentados de forma sistemática com um enunciado formal, por exemplo, no fim dos capítulos, como sucede em muitas obras de natureza pedagógica. Os exercícios e problemas vão sendo apresentados e sugeridos ao longo do texto, inseridos neste, na continuidade dos assuntos expostos, sem nenhum separador ou título formal. Esta metodologia justifica-se pelo carácter de pós-graduação da obra, embora de índole pedagógica.

Cada capítulo contém o seu próprio corpo de equações, figuras, tabelas e apêndices. Por isso, a ordenação de cada um destes *itens* é fechada em cada capítulo com indicação de duas numerações separadas por um ponto — a primeira numeração diz respeito ao capítulo e a segunda à ordem do *item* dentro do capítulo. As equações são referidas com parêntesis curvo, as figuras com a abreviatura “Fig.”, as tabelas com o nome “Tabela” e os apêndices com a palavra “Apêndice”. Assim, por exemplo, (3.21) é a equação 21 do Capítulo 3, Fig. 5.6 é a figura 6 do Capítulo 5, Tabela 7.1 é a tabela 1 do Capítulo 7 e o Apêndice 3.2 é o apêndice 2 do Capítulo 3.

Importa, agora, para finalizar este prefácio, apresentar uma nota explicativa acerca das referências bibliográficas, indicadas no texto com parêntesis reto.

Muitas são as obras e os autores que influenciaram e constituíram a base para a escrita deste livro. As referências indicadas são, por um lado, as mais importantes e mais significativas sob o ponto de vista histórico, ou pelo seu conteúdo, e, por outro lado, aquelas outras que evidenciam as contribuições mais importantes do autor no que diz respeito ao tema da presente obra. Algumas destas referências são importantes no contexto de vários capítulos. Por este motivo, optou-se por estabelecer uma lista bibliográfica única apresentada no final do livro. A ordem da lista foi estabelecida tendo em conta um compromisso entre importância, interligação com a sequência dos conteúdos apresentados, a cronologia das obras e o tipo de publicação (livro, capítulo de livro ou artigo).

A primeira parte da lista é constituída pelos livros que constituem a principal fonte inspiradora dos conceitos apresentados e da metodologia seguida. A referência [1] de autoria de K. Simonyi (1916–2001) foi escolhida como primeira referência bibliográfica por constituir a obra que melhor se adequa ao ponto de vista apresentado pelo autor deste livro e, ainda, por representar citação apropriada para vários capítulos do livro. A referência [2] é de autoria do físico A. Sommerfeld (1868–1951). A esta personalidade se devem várias contribuições relacionadas com a Mecânica Quântica e desenvolvimentos importantes respeitantes, principalmente, a problemas da Radiação Eletromagnética no contexto do eletromagnetismo clássico. Nas obras deste físico, em particular em [2], procura-se esclarecer de forma sistemática o significado físico de cada resultado apresentado ou obtido. Nestas obras, o desenvolvimento do *racional* de natureza física em nada prejudica o rigor matemático das suas deduções e resultados. Trata-se de um aspeto que é de primordial importância do ponto de vista pedagógico. Este é, como já foi referido, o ponto de vista também do presente livro, embora, evidentemente, sem a profundidade, a pertinência e a genialidade demonstradas nas obras de Sommerfeld. As referências [3–5] constituem e constituíram as referências base para o ensino das disciplinas de Electrotecnia Teórica do MEEC (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) do IST (Instituto Superior Técnico). Esta disciplina constitui a base científica e formativa das disciplinas de *Simulação dos Campos em Electrotecnia* e de *Métodos Computacionais em Electromagnetismo* para as quais este livro é suporte. As referências [3–5] têm o mesmo ponto de vista geral que o presente livro e incluem os aspetos mais relevantes da Engenharia Electrotécnica desde a área da Energia Elétrica às de Telecomunicações. A referência [3] é de autoria do Professor Brandão Faria, meu colega e amigo, e constitui o atual texto base para o en-

sino de Electrotecnia Teórica. As referências [4–5] são de autoria do Professor Borges da Silva, com quem tive a oportunidade de aprender os temas relacionados com o conteúdo da presente obra. A referência [6] é indicada por constituir um importante contributo para o ensino do eletromagnetismo clássico cujo autor, J. Stratton (1901–1994), foi um distinto Professor e Presidente do MIT (Massachusetts Institute of Technology).

Todas as referências de [16] a [68] são artigos publicados em revistas científicas internacionais e aparecem pela ordem com que são citados no texto. Dizem respeito a trabalhos que exemplificam ou que apresentam resultados obtidos por uso dos métodos introduzidos neste livro. Alguns destes artigos ilustram trabalhos do autor, dando conta da contribuição do longo trabalho de investigação para a escrita desta obra. Refira-se, em particular, os trabalhos levados a cabo pelo autor no âmbito de vários projetos de investigação apoiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) do Governo de Portugal.

As referências terminam com algumas outras obras, livros, monografias, páginas de *internet*, em geral de importância menor, tendo em conta o âmbito e objetivos da obra, mas que são citadas ao longo do texto.