

PROPAGAÇÃO E RADIAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Autoria:

Maria João Martins e Isabel Ventim Neves

2.^a edição



Índice Geral

Agradecimentos.....	XIII
Prefácios.....	XV
Sobre o Livro	XIX
Sobre as Autoras	XXIII
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 A história do Eletromagnetismo	1
1.2 O espectro eletromagnético	10
Capítulo 2 Conceitos Fundamentais.....	13
2.1 Introdução	13
2.1.1 Conceito de fase	14
2.1.2 Velocidade de fase	15
2.1.3 Onda plana em notação complexa	17
2.1.4 Significado das constantes de fase (ω, k).....	19
2.2 Equações de Maxwell.....	21
2.2.1 Forma diferencial das equações de Maxwell	21
2.2.2 Forma integral das equações de Maxwell.....	23
2.2.3 Equações de Maxwell em variável complexa	26
2.3 Teorema de Poynting.....	27
2.3.1 Forma local e instantânea	27
2.3.2 Teorema de Poynting complexo	30
2.4 Estudo da onda plana monocromática	35
2.4.1 Introdução.....	35
2.4.2 Onda plana no vácuo	37
2.5 Polarização	41
2.5.1 Introdução.....	41
2.5.2 Razão de polarização.....	42
2.5.3 Curva de polarização	43
2.5.4 Esfera de Poincaré	45
2.5.5 Polarização da onda emitida	46
2.5.6 Adaptação de polarização	47
2.5.7 Cálculo de C_p	48

2.6 Propagação em meios ilimitados	53
2.6.1 Propagação em meios sem perdas	53
2.6.2 Propagação em meios com perdas	58
2.7 Casos particulares	63
2.7.1 Bons condutores	64
2.7.2 Profundidade de penetração	65
2.7.3 Dielétricos com fracas perdas	68
2.8 Perguntas de revisão	71
2.9 Problemas propostos	72
Capítulo 3 Meios Semi-Ilimitados	77
3.1 Introdução	77
3.1.1 Conceito de fase	77
3.1.2 Fronteira entre meios de condutividade finita	77
3.1.3 Fronteira com condutor perfeito	81
3.1.4 Condições-fronteira normalmente utilizadas	84
3.2 Leis da reflexão e transmissão	84
3.2.1 Fronteira entre meios de condutividade finita	84
3.2.2 Fronteira entre meios dielétricos perfeitos	87
3.2.3 Ângulo limite	89
3.3 Coeficientes de reflexão e transmissão	89
3.3.1 Polarização TE	90
3.3.2 Polarização TM	92
3.4 Ângulo de Brewster	99
3.5 Reflexão total	105
3.5.1 Estrutura ondulatória no meio (1)	106
3.5.2 Reflexão total metálica	110
3.5.3 Reflexão total dielétrica	118
3.5.4 Estudo da onda evanescente	119
3.6 Breve introdução à propagação guiada	129
3.7 Perguntas de revisão	130
3.8 Problemas propostos	130
Capítulo 4 Guias de Onda	137
4.1 Introdução	137
4.2 Guia planar de paredes metálicas	138
4.3 Guias ocos metálicos	144
4.3.1 Determinação dos modos de propagação	148
4.4 Guia oco de secção retangular	148

4.4.1	Determinação das componentes de suporte	153
4.4.2	Características de propagação no guia	156
4.4.3	Modo fundamental do guia de secção retangular	160
4.4.4	Potência transmitida	165
4.4.5	Perdas e atenuação	167
4.5	Guia de secção circular	175
4.5.1	Equação de Helmholtz	176
4.5.2	Potência transmitida no modo TE_{01}	183
4.6	Aplicações de guias metálicos ocos	186
4.7	Cavidades ressonantes	189
4.7.1	Determinação dos modos de cavidades ressonantes	190
4.7.2	Fator de qualidade de uma cavidade ressonante	194
4.7.3	Acoplamento da cavidade e aplicações	196
4.8	Perguntas de revisão	199
4.9	Problemas propostos	200
Capítulo 5	Fibras Óticas	211
5.1	Introdução	211
5.2	Parâmetros fundamentais	212
5.3	Aproximação da ótica geométrica	216
5.4	Análise modal	221
5.4.1	Análise modal com contraste arbitrário	222
5.4.2	Análise modal: aproximação de pequeno contraste	228
5.5	Dispersão em fibras óticas	239
5.5.1	Dispersão intermodal	240
5.5.2	Dispersão intramodal	243
5.6	Perdas e atenuação em fibras óticas	247
5.7	Perguntas de revisão	251
5.8	Problemas propostos	252
Capítulo 6	Linhas de Transmissão	259
6.1	Introdução	259
6.2	Parâmetros distribuídos associados ao modo TEM	264
6.2.1	Equações de Maxwell no modo TEM	264
6.2.2	Cálculo de parâmetros	264
6.2.3	Perdas no dielétrico	267
6.3	Regime de onda estacionária	277
6.3.1	Fator de reflexão	278
6.3.2	Impedância de entrada	279

X Propagação e Radiação de Ondas Eletromagnéticas

6.3.3 Tensão de entrada.....	280
6.3.4 Operador linear de transmissão.....	280
6.4 Linha de transmissão com perdas	280
6.4.1 Representação gráfica da tensão e corrente: linha com perdas	281
6.4.2 Aproximações em radiofrequência	283
6.5 Linha sem perdas.....	284
6.5.1 Andamento da tensão e corrente ao longo de uma linha sem perdas	285
6.5.2 Valores instantâneos da tensão ou corrente numa linha sem perdas	295
6.6 Adaptação de linhas de transmissão	297
6.6.1 Adaptação com um transformador de $\lambda/4$	297
6.6.2 Adaptação com um <i>stub</i> simples	299
6.7 Métodos gráficos: Carta de Smith	300
6.7.1 Determinação do fator de reflexão K_v e do coeficiente de onda estacionária p , usando a Carta de Smith	303
6.7.2 Determinação da impedância em qualquer ponto da linha de transmissão, usando a Carta de Smith.....	305
6.7.3 Determinação da admitância em qualquer ponto da linha de transmissão, usando a Carta de Smith	306
6.7.4 Determinação da tensão e corrente ao longo da linha de transmissão, usando a Carta de Smith	307
6.7.5 Adaptação de uma linha de transmissão com um <i>stub</i> simples.....	308
6.8 Perguntas de revisão.....	314
6.9 Problemas propostos	314
Capítulo 7 Radiação	325
7.1 Introdução	325
7.2 Potenciais vetor e escalar.....	326
7.2.1 Definição dos potenciais.....	327
7.2.2 Cálculo dos potenciais	328
7.2.3 Variação temporal harmónica	330
7.2.4 Campo radiado por um elemento de corrente	335
7.2.5 Campo radiado por antenas lineares	337
7.2.6 Campo radiado por uma espira elementar	337
7.3 Dualidade e equivalência	341
7.3.1 Dualidade das equações de Maxwell.....	341
7.3.2 Equivalência.....	348
7.3.3 Campo radiado por aberturas planas.....	353
7.4 Noções e parâmetros fundamentais.....	354
7.4.1 Tipos de antenas	354
7.4.2 Zonas de campo emitido por antenas.....	355
7.4.3 Potência radiada	356
7.4.4 Diagramas de radiação	358
7.4.5 Largura de feixe	361

7.4.6	Intensidade de radiação e diretividade.....	362
7.4.7	Ganho e abertura efetiva.....	371
7.4.8	Fórmulas de Friis	374
7.4.9	Ruído externo à recepção	381
7.5	Teorema da reciprocidade e aplicações	385
7.5.1	Reciprocidade.....	385
7.5.2	Teorema da reciprocidade	385
7.5.3	Aplicação a antenas dipolares	390
7.6	Perguntas de revisão.....	394
7.7	Problemas propostos	394
Capítulo 8	Antenas	401
8.1	Introdução	401
8.2	O Dipolo Elétrico de Hertz (DEH).....	403
8.2.1	DEH dirigido segundo z	406
8.2.2	O Monopolo Elétrico de Hertz (MEH)	413
8.3	Antenas lineares	415
8.3.1	Campo radiado	415
8.3.2	Distribuição de corrente	417
8.3.3	Potência radiada	418
8.3.4	Parâmetros fundamentais.....	419
8.4	Aplicação às antenas lineares	422
8.4.1	Dipolo Elétrico Curto (DEC).....	422
8.4.2	Dipolo de meia onda ($2\ell = \lambda/2$)	424
8.4.3	Dipolos anti-ressonantes.....	425
8.4.4	Resumo das características das antenas lineares.....	427
8.4.5	Resistência de radiação e diretividade.....	433
8.5	Interação entre antenas	435
8.6	Agregados	438
8.6.1	Parâmetros fundamentais dos agregados.....	439
8.6.2	Agregados de duas antenas	442
8.6.3	Ganho do agregado.....	448
8.7	Agregados uniformes de N antenas	453
8.8	Antenas em recepção.....	459
8.8.1	Ligação hertziana	460
8.8.2	Aplicação do princípio de reciprocidade	469
8.9	Perguntas de revisão.....	475
8.10	Problemas propostos	476
8.11	Antenas inteligentes (<i>smart antenas</i>)	487

Apêndice A Elementos de Apoio	499
Apêndice B Complexos e Vetores Complexos.....	503
B.1 Representação de complexos.....	503
B.2 Complexo conjugado	504
B.3 Operações sobre complexos	504
B.4 Representação complexa de vetores	505
B.5 Módulo de um vetor complexo	506
Apêndice C Vetores de Base e Álgebra Vetorial.....	507
C.1 Vetores de base e bases ortonormadas	507
C.2 Álgebra vetorial na base $[e_1, e_2, e_3]$	508
C.3 Produto misto	510
C.4 Duplo produto externo.....	510
Apêndice D Sistemas de Coordenadas e Operadores Diferenciais	511
D.1 Sistemas de coordenadas.....	511
D.2 Transformação de coordenadas	512
D.3 Operadores diferenciais	513
Apêndice E Relações Matemáticas	516
E.1 Funções trigonométricas.....	516
E.2 Funções hiperbólicas.....	518
E.3 Funções logarítmicas	519
E.4 Funções de Bessel $[J_n(x)]$	520
E.5 Integrais de Fresnel $[C_i(x), S_i(x)]$	523
Nomenclatura Geral e Lista de Acrónimos.....	525
Lista de Símbolos	527
Glossário de Termos Correspondentes em Português Europeu e Português do Brasil	535
Bibliografia	537
Índice Remissivo	539

Agradecimentos

A elaboração deste livro resulta da experiência científica e pedagógica desenvolvida pelas Autoras na leção, ao longo de mais de 30 anos, da unidade curricular “Propagação e Radiação de Ondas Eletromagnéticas”, disciplina que integra o tronco comum do curso de Engenharia Eletrotécnica e Computadores no Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa (UL), na Academia Militar e na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), embora com o nome de “Propagação e Radiação”. É de referir também que foi lecionada no Curso Politécnico da Academia da Força Aérea (AFA), com o nome de “Propagação, Radiação e Antenas”.

Queremos dedicar este livro ao Professor Manuel José Castro Petrony de Abreu Faro, que foi o iniciador desta disciplina no curso de Engenharia Eletrotécnica no IST, tendo introduzido neste curso o estudo e o ensino das bases científicas das telecomunicações. Esta disciplina faz parte atualmente do Mestrado Integrado neste ramo da engenharia. Como responsável da disciplina e orientador científico das Autoras, deixou um testemunho de rigor científico e modernidade que esperamos ter refletido na presente obra.

Queremos ainda agradecer aos colegas da antiga Secção de Propagação e Radiação do IST e do Departamento de Ciências e Tecnologias da Engenharia (DCTE) da Academia Militar, a colaboração prestada ao longo destes anos, bem como as críticas e sugestões construtivas recebidas. Um agradecimento particular aos Professores José Luis Correia da Mata, António Joaquim Serralheiro e Pedro Nuno Mendonça dos Santos, bem como ao Mestre Filipe Conceição pela sua inestimável ajuda na realização de algumas fotografias e gráficos deste livro.

Aos nossos alunos da Academia Militar, FCT da Universidade Nova de Lisboa, e do Instituto Superior Técnico, pelo encorajamento na produção deste livro, críticas e revisão dos problemas. Aos nossos alunos de Mestrado que têm constituído uma fonte de aprendizagem e colaboração, que tem permitido progredir nestes domínios, é também devido um agradecimento especial.

Finalmente, os nossos agradecimentos ao Engenheiro Frederico Annes, nosso editor, bem como à Dra. Patrícia Espinha, assistente editorial da Lidel, pela sua ajuda na formatação deste livro e pelas muitas e valiosas sugestões que permitiram melhorar o texto que aqui apresentamos.

Por último, queremos agradecer às nossas famílias o apoio incondicional que nos deram durante a elaboração deste livro.

Prefácios

António S. Carvalho Fernandes

Professor Catedrático no Instituto Superior Técnico

O Universo parece constituir-se com quatro forças universais. A Física admite que essas forças atuam em partículas, com variadíssimos atributos e mesmo sem massa, com as quais todo o Universo é construído. Uma dessas forças atua nas partículas elétricas e numa carga magnética que pode ser pensada como resultante do movimento das cargas elétricas: trata-se da força eletromagnética.

A ação desta força nas cargas é medida pelos campos elétrico e magnético, cuja interligação corresponde à energia eletromagnética. Esta, se for dinâmica, torna-se independente das cargas.

As cargas e correntes, bem como as suas energias e potenciais, são conservativas, o que levou Maxwell a compilar o conhecimento da época na escrita dessas leis de conservação numa forma matemática diferencial universal e completa. As soluções dessas equações são ondas eletromagnéticas (*Propagation of Undulations in a Non-conductive Medium*), as quais propagam e transportam energia eletromagnética de forma independente das fontes, levando a ação a todas as distâncias e contribuindo para interligar todas as componentes do Universo.

É nesta onda portadora que se apoia hoje toda a tecnologia da comunicação da informação, um dos pilares da nossa civilização, modulando adequadamente a sua densidade de energia. Os sistemas tecnológicos criam e recebem estas ondas, dominando as leis da propagação guiada por fonteiras e em meios indefinidos ou limitados.

Este livro descreve os fundamentos físicos desses sistemas tecnológicos da comunicação, sendo os primórdios, a história, os conceitos fundamentais, a propagação e a radiação aqui tratados com detalhe, na abordagem tradicional do nosso mestre Professor Manuel Abreu Faro.

Escrita numa estrutura dedutiva das leis mais gerais para as aplicações particulares, pouco entrando na especificidade tecnológica, esta obra serve a Engenharia Eletrotécnica nos seus fundamentos, não tanto na simples aplicação da tecnologia.

As autoras dedicaram as suas já longas carreiras científicas e pedagógicas a esta matéria, o que se reflete no carácter marcadamente pedagógico deste livro, oferecendo aos alunos de Engenharia uma boa divisão por capítulos, rigor formal, explicação matemática profunda, notação simbólica completa, com significados e dimensões, e questões e respostas com exercícios resolvidos.

Um livro como este é muito bem-vindo e tem garantido o interesse dos melhores alunos.

Janeiro de 2015

Anselmo Seoane

Professor Catedrático na Universidade de Vigo

El objetivo principal de la obra *Propagação e Radiação de Ondas Eletromagnéticas*, que publican las Profesoras Maria João Martins y Isabel Neves, es dar una visión básica y general del fenómeno de la propagación y de la radiación electromagnética; estudiando, por una parte, la propagación en el espacio libre y en regiones confinadas y, por otra parte, los parámetros básicos que se utilizan en el estudio de la radiación, presentando además los tipos de antenas más comunes. La obra es fruto de la gran experiencia de las autoras, adquirida tanto en sus clases como en sus trabajos de investigación. Será de gran utilidad para los estudiantes, tanto de Física como de Ingeniería, y llena un hueco existente en la literatura en lengua portuguesa.

El libro, desarrollado en ocho capítulos, cuenta con una interesante y actualizada introducción sobre la imparable evolución de las telecomunicaciones. Pensemos que hace poco más de un siglo que existe la teoría general del electromagnetismo propuesta por J. C. Maxwell, la cual ha dado lugar a la temática aquí desarrollada.

Después de este tema introductorio, el libro se divide globalmente en tres partes. En la primera parte, se repasan los conceptos básicos de campos y potenciales, las ecuaciones de Maxwell y su aspecto energético (vector de Poynting), así como las ecuaciones de onda. Se analiza la onda plana en el espacio libre y en presencia de obstáculos planos. En una segunda parte, se desarrolla el estudio de la transmisión de la energía y la información, usando diferentes soportes físicos: guías de onda, líneas de transmisión y guías dieléctricas (en el caso de las líneas se hace hincapié en los métodos de solución gráfica como la carta de Smith). Se termina este bloque con un estudio detallado de las cavidades resonantes derivadas de las guías de onda. Finalmente se estudia el fenómeno de la radiación electromagnética, definiendo por una parte las ecuaciones que la rigen y los parámetros básicos que se utilizan para caracterizar dicha radiación. Por otra parte, se estudian los tipos de antenas más comunes.

Creo que este libro cumple eficazmente la idea para la que se ha escrito: sentar las bases de la propagación y de la radiación electromagnética; y permitir, si se desea, profundizar en el estudio de las telecomunicaciones, dominio que se agranda y complica sin cesar. El estudiante apreciará los muchos problemas que se proponen y resuelven al final de cada

capítulo. Así mismo, son de gran utilidad los ejercicios de revisión propuestos y que permiten una autoevaluación por parte del lector.

Como Profesor de Electromagnetismo en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad de Vigo, durante más de treinta años, quiero felicitar a las autoras por esta nueva guía escrita con sencillez y claridad, que será, sin duda, de gran utilidad en la sociedad científica de lengua portuguesa.

Vigo, febrero de 2015

Sobre o Livro

Este livro engloba os vários conceitos respeitantes às ondas eletromagnéticas, seu formalismo, propriedade e aplicações.

No Capítulo 1, “Introdução”, faz-se um breve historial do Eletromagnetismo desde os seus primórdios até às aplicações atuais, estabelecendo a ligação entre as várias bandas do espectro de rádio e as suas aplicações.

No Capítulo 2, “Conceitos Fundamentais”, inicia-se o estudo das ondas eletromagnéticas, que são a solução das equações de Maxwell. São estudadas estas equações, na sua forma local e integral, passando em seguida para os conceitos energéticos associados. Introduce-se o conceito do vetor de Poynting e o teorema complexo de Poynting e define-se a polarização de uma onda, introduzindo a esfera de Poincaré. Estuda-se ainda a propagação de ondas eletromagnéticas (EM) em meios ilimitados, particularizando para os casos de bons condutores e bons dielétricos.

No Capítulo 3, “Meios Semi-Ilimitados”, estuda-se o caso da propagação de ondas eletromagnéticas que transitam entre dois meios, atravessando uma fronteira. O seu comportamento é regido pelas condições-fronteira, que são estabelecidas e aplicadas às leis da reflexão e transmissão. Deduzem-se os fatores de reflexão e transmissão para as polarizações horizontal (TE) e vertical (TM). Estuda-se a incidência segundo o ângulo de Brewster e a reflexão total, numa fronteira metálica e numa fronteira dielétrica. Este capítulo finaliza com uma breve introdução à propagação guiada.

No Capítulo 4, “Guias de Onda”, aborda-se a propagação guiada por uma superfície, passando ao caso dos guias planares metálicos e, posteriormente, aos guias metálicos ocos. São estudadas as soluções modais correspondentes aos guias ocos de secção retangular e circular de paredes metálicas. Este capítulo termina com um estudo das cavidades ressonantes paralelepédicas e cilíndricas, derivadas de guias de onda.

No Capítulo 5, “Fibras Óticas” dá-se início ao estudo da propagação em fibras óticas. São introduzidos os vários tipos de fibras óticas e os regimes de funcionamento: monomodal e multimodal. É feita a análise modal com introdução dos modos híbridos HE_{mn}

e EH_{mn} , que, para fibras de pequeno contraste, degeneram nos modos LP_{mn} . A influência da atenuação e da dispersão nos vários regimes de funcionamento e janelas de utilização é estudada no fim deste capítulo.

O Capítulo 6, “Linhas de Transmissão”, trata da propagação em linhas de transmissão: linhas bifilares e cabos coaxiais. Trata-se de estruturas que suportam modos TEM. Das equações canônicas das linhas derivam-se as expressões da tensão, corrente e impedância ao longo da linha. Considera-se a seguir a Carta de Smith, método gráfico que permite resolver com facilidade os problemas de linhas de transmissão de alta frequência. São explicados os métodos de adaptação mais utilizados em radiofrequência, como o stub simples e o transformador de quarto de comprimento de onda. Este capítulo inclui ainda um estudo da sensibilidade em frequência que é ilustrado com diversos problemas. O capítulo termina com uma seção dedicada ao dimensionamento de linhas para várias aplicações e as suas condicionantes.

No Capítulo 7, “Radiação”, são introduzidos os conceitos-base relativos, que permitem a determinação do campo radiado a partir das fontes primárias através dos potenciais escalar e vetor. É efetuado o cálculo do campo radiado por um elemento de corrente elétrica e por uma espira elementar. São introduzidas as equações de Maxwell duais e o dicionário da dualidade. Os princípios da dualidade e equivalência são aplicados ao campo radiado por um elemento de corrente magnética e equivalência com a espira elementar, e ao campo radiado por uma abertura elementar. São introduzidos os conceitos fundamentais de elementos radiadores: diagramas de radiação, largura de feixe, diretividade, ganho e área efetiva, potências disponível e recebida e largura de banda. O capítulo termina com considerações sobre o ruído externo na recepção, com a apresentação das suas características e origens.

No capítulo 8, “Antenas”, são estudados os diversos tipos de antenas, começando com o Dipolo Elétrico de Hertz (DEH), passando ao Dipolo Elétrico Curto (DEC) e monopolos respetivos. Abordam-se em seguida as antenas lineares, sendo feito um estudo exaustivo dos seus parâmetros em função da variação do comprimento elétrico ($2l/\lambda$) destas antenas. Segue-se o estudo de agregados de antenas, nomeadamente dos fatores que influenciam o seu comportamento: diferença de percurso, fator espacial, diagrama de radiação do agregado e agregado antena-imagem, de que são dadas diversas aplicações. Considera-se a ligação hertziana e os conceitos relativos a antenas em recepção: introduz-se o conceito de abertura efetiva de recepção, estuda-se o balanço energético e as melhores condições de transferência

de potência. Faz-se uma aplicação do teorema da reciprocidade com vista a demonstrar a equivalência entre parâmetros definidos em emissão e em recepção.

Este capítulo termina com uma breve introdução às antenas inteligentes (*smart antenas*), uma matéria de grande atualidade, em que uma das autoras (Maria João Martins) tem desenvolvido intensa atividade científica nos últimos cinco anos, com a publicação de vários artigos em revistas da especialidade, orientando teses de mestrado e coordenando projetos de investigação nesta área.

No final do livro incluem-se alguns Apêndices, onde se reveem conceitos fundamentais para a compreensão do principal conteúdo do livro. Assim, no Apêndice A, “Elementos de Apoio”, introduz-se o Sistema Internacional de Unidades (SI) e apresentam-se constantes matemáticas e físicas fundamentais, a Carta de Smith e o alfabeto grego. No Apêndice B, “Complexos e Vetores Complexos”, relembra-se o cálculo com variáveis complexas, incluindo a sua representação no plano complexo, operações sobre complexos e representação complexa de vetores. No Apêndice C, “Vetores de Base e Álgebra Vetorial”, é feita uma revisão de álgebra vetorial, incluindo vetores de base e bases ortonormadas e as principais operações da álgebra vetorial e suas propriedades: produto interno, produto externo, produto misto e duplo produto externo. No Apêndice D, “Sistemas de Coordenadas e Operadores Diferenciais”, apresentam-se os sistemas de coordenadas retangulares cilíndricas e esféricas e as fórmulas de transformação de coordenadas. Introduzem-se também os operadores diferenciais gradiente, divergência, rotacional e laplaciano, bem como a sua representação nos sistemas de coordenadas mencionados. Por último, no Apêndice E, “Relações Matemáticas”, examinam-se as funções trigonométricas, hiperbólicas, logarítmicas, integrais de Fresnel e funções de Bessel. São apresentados desenvolvimentos em série de funções, valores assintóticos e valores para pequenos argumentos, fórmulas de recorrência e tabelas para as funções de Bessel e integrais de Fresnel.

Sobre as Autoras



Maria João Marques Martins nasceu em Lisboa. Obteve a Licenciatura em 1978 e o Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica no Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade Técnica de Lisboa (UTL). Lecionou as disciplinas de Propagação e Radiação do atual Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores do IST, e é Regente das disciplinas de Eletrotecnia Teórica e de Propagação e Radiação de Ondas Eletromagnéticas do Curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica Militar da Academia Militar, em Lisboa, e da disciplina de Eletrotecnia Teórica do Curso de Engenharia Eletrotécnica da Academia da Força Aérea (AFA). Atualmente, é ainda Regente da disciplina de Sistemas Elétricos e Eletromecânicos do Mestrado em Engenharia Mecânica Militar na Academia Militar.

O seu trabalho de investigação tem incidido nos domínios da propagação linear e não linear em fibras óticas, propagação em meios complexos e antenas de fendas radiantes em guias de onda, propagação por efeito NVI e antenas inteligentes impressas para comunicações sem fios (*wireless*), aplicadas a *drones* terrestres e aéreos.

Foi Professora Convidada da Université de Rennes 1, em França, no *Institut d'Électronique et Télécommunications de Rennes* (IETR), no ano de 2004, e Professora Convidada no *Institut für Festkörper Physik* da Universidade de Karlsruhe, na Alemanha (ano letivo de 1992/93). Foi bolseira da Fundação Heraeus e recebeu também uma bolsa da Fundação Calouste Gulbenkian, na Universidade do Michigan, em Ann Arbor, nos Estados Unidos da América (EUA) (ano letivo de 1982-83), tendo iniciado a tese de doutoramento no *Radiation Laboratory*, sob orientação do Prof. Chen-To Tai. Foi também coordenadora de várias redes temáticas europeias, projetos europeus e de colaboração com a América Latina. Integrou os comités científicos de diversas publicações e conferências internacionais. É autora de inúmeras publicações nos domínios mencionados e também no âmbito da educação em Engenharia Eletrotécnica e Computadores.



Isabel Ventim Neves nasceu em Lisboa, em 1951. Obteve a Licenciatura em 1974 na Universidade de Luanda (UL), em Angola, e o Mestrado e Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica no IST, da UTL, em 1985 e 1992, respetivamente.

Atualmente, é Professora Auxiliar no Departamento de Engenharia Eletrotécnica da FCT, na UNL. É também Investigadora no Centro de Tecnologias e Sistemas (CTS), da FCT, onde tem realizado trabalho em propagação de ondas eletromagnéticas em estruturas dielétricas

cilíndricas tipo fibras óticas, com núcleo que pode ser constituído por material anisotrópico e homogéneo ou isotrópico e radialmente não homogéneo; em antenas impressas de banda larga; e em antenas constituídas por fendas radiantes em guias de ondas.

A sua atividade docente tem incidido na área de propagação e radiação de ondas eletromagnéticas e suas aplicações, no IST, FTC e AFA, em Lisboa, e também em Eletromagnetismo, no IST, e Eletrotecnia Teórica, na FCT. Deu aulas no âmbito de um protocolo de colaboração em Dili, Timor Leste.

Antes do eclodir da Segunda Guerra Mundial, aparecem os primeiros geradores capazes de fornecer sinais com frequências até 1 GHz, os clistrões e magnetrões, e surgem também os primeiros guias de onda.

Em 1931, dá-se a primeira transmissão na banda de frequências das micro-ondas, através do Canal da Mancha, entre Dover (Inglaterra) e Calais (França), usando guias de onda ocos e metálicos.

Em 1940, durante a Segunda Guerra Mundial, efetuam-se as primeiras utilizações do radar, acrónimo de *Radio Detection and Ranging*.

Em 1944, surge o primeiro computador eletrónico, denominado *Colossus* (Figura 1.9), usado para decifrar as mensagens da máquina *Enigma* durante a Segunda Guerra Mundial.

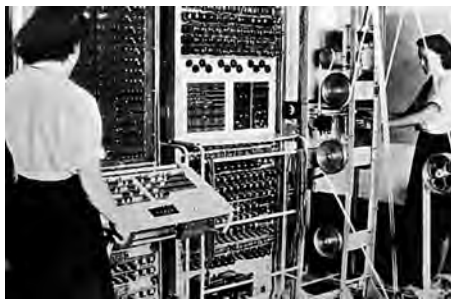


Figura 1.9 O computador *Colossus*, desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial (1944).

Em 1950, surgem as estruturas planares de alta frequência: guias planares, *striplines*, *microstrips* e *slotlines*.

Em 1934, dá-se a primeira emissão de televisão. O cientista e escritor de ficção científica Arthur C. Clarke sugere, em 1945, a utilização de satélites artificiais geoestacionários para permitir a comunicação a grande distância.

Em 1957, a URSS lança o primeiro satélite artificial: o *Sputnik I* (Figura 1.10). Na década seguinte, em 1962, é lançado pelos EUA o primeiro satélite comercial de comunicações: *Telstar 1*.

Devido ao enorme potencial das suas aplicações, os metamateriais e as nanotecnologias irão revolucionar profundamente o paradigma das comunicações e terão profundas consequências na defesa, no ensino, na segurança e na sociedade em geral.

1.2 O espectro eletromagnético

Todos estes desenvolvimentos deram origem à sociedade da informação atual e alteraram profundamente a nossa forma de estar e de comunicar. A Internet, as redes sociais e as compras *on-line* são parte integrante do nosso modo de vida, embora fossem desconhecidas há 30 anos atrás.

Estas tecnologias têm na sua base as ondas eletromagnéticas, entre as quais se contam a luz visível, os raios X, os raios gama, a radiação infravermelha, e as ondas de rádio. Todas estas formas de radiação têm em comum algumas propriedades fundamentais, que se enunciam a seguir:

- As ondas eletromagnéticas são constituídas por dois campos – o campo elétrico E e o campo magnético H . Numa onda, estes dois campos oscilam à mesma frequência f e autoinduzem-se;
- As ondas eletromagnéticas propagam-se no ar (ao qual é possível aplicar o modelo do vácuo clássico), com a velocidade da luz – $c = 3.10^8 \text{ ms}^{-1}$;
- No vácuo, a relação entre a frequência da onda, definida como o inverso do período temporal T , e o comprimento de onda λ (período espacial da onda), é dada pela velocidade c .

$$c = \lambda f \quad (1.1)$$

As ondas distinguem-se pela sua frequência f ou pelo seu comprimento de onda λ , que é uma descrição equivalente.

A parte visível deste conjunto de frequência designa-se por “espectro visível” e ocupa uma faixa estreita de comprimentos de onda, que vai desde $\lambda = 0.4 \text{ }\mu\text{m}$ (violeta) até $\lambda = 0.7 \text{ }\mu\text{m}$ (vermelho).



-
- Ondas eletromagnéticas
 - Equações de Maxwell
 - Teorema de Poynting
 - Polarização
 - Propagação em meios ilimitados
-

2.1 Introdução

Pode definir-se onda como uma perturbação que se desloca no espaço e no tempo, transportando energia, sendo que:

- Deslocação no espaço e no tempo: o que ocorre num dado ponto num dado instante vai ocorrer “mais tarde” e “mais à frente” (noção de tempo sempre crescente e conceito espacial de “mais à frente” definido pelo sentido de propagação da onda);
- Transporte de energia: no caso concreto de ondas eletromagnéticas, os campos eléctrico ($\mathbf{E}$) e magnético ($\mathbf{H}$) associam-se de forma a originarem o vetor de Poynting, diferente de zero, orientado segundo a direção e o sentido de propagação da onda. O vetor de Poynting em valores instantâneos é dado por:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{W.m}^{-2})$$

e representa a densidade de potência transmitida numa direção perpendicular aos dois campos.

Numa zona distante, qualquer estrutura de dimensão finita origina ondas esféricas: basta considerar o exemplo das estrelas, muitas vezes sistemas binários ou ainda mais complexos, que vistas por nós a olho nu são pontuais. No entanto, a grandes distâncias, uma secção esférica pode ser localmente substituída pelo plano tangente. Na Figura 2.1 representa-se uma onda esférica e a onda plana a que dá origem muito longe da fonte.



-
- Tipos de fibras óticas
 - Parâmetros característicos
 - Aproximação da ótica geométrica
 - Teoria Modal
 - Tipos de dispersão: intermodal e intramodal
 - Atenuação e perdas
-

5.1 Introdução

A comunicação em fibra ótica faz uso de um princípio que já foi estudado no Capítulo 3 – o princípio da reflexão total na fronteira de dois dielétricos.

A utilização e o desenvolvimento das fibras óticas como meio de transmissão só foi possível com o aparecimento do laser, em 1958, devido a C. H. Townes do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) em 1958. Esta descoberta valeu a C. H. Townes o prêmio Nobel da Física em 1964. Em 1966, Charles K. Kao (prêmio Nobel da Física em 2009) e George A. Hockham sugeriram o emprego de fibras de vidro como meio de transmissão do sinal ótico proveniente de um laser, e provaram que a eliminação de impurezas da sílica poderia proporcionar níveis de atenuação competitivos face a outros meios de transmissão.

Em 1970, a Corning Glass Works conseguiu produzir fibras de núcleo homogêneo (*step-index fibres*) com valores de atenuação inferiores a 20 dB/km na risca dos $\lambda = 633$ nm.

Nesse mesmo ano, iniciou-se a produção de fibras de núcleo com índice não homogêneo (*graded-index fibres*), em que a variação radial do índice de refração do núcleo permitia focagem dos vários modos no eixo da fibra.

A resposta destas fibras era substancialmente melhor que as anteriores, possibilitando atingir atenuações de cerca de 4 dB/km. Hoje em dia, a tendência é empregar fibras de

6.3 Regime de onda estacionária

Consideremos então uma linha de transmissão, operada em radiofrequência, alimentada por um gerador, com tensão em vazio V_0 e impedância interna Z_g , terminada por uma impedância de carga que tem um valor diferente da impedância característica da linha Z_L . Definiremos ainda um sistema de referência que nos permite localizar pontos ao longo da linha. O terminal de entrada corresponde a $z = 0$, e o terminal de carga a $z = \ell$, como representado na Figura 6.11.

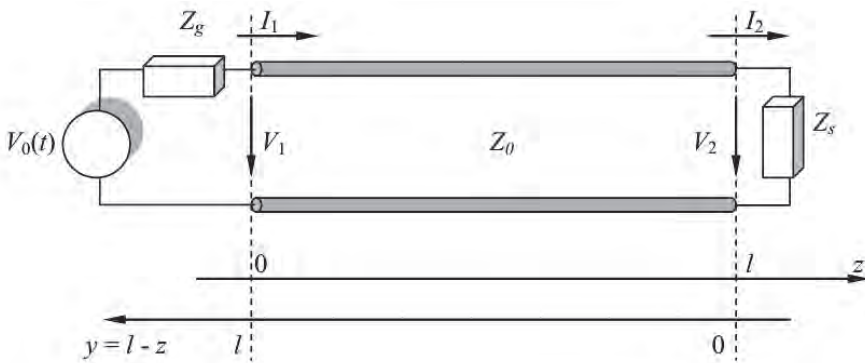


Figura 6.11 Linha de transmissão com impedância característica Z_L , terminada por uma impedância de carga Z_s , alimentada por um gerador com tensão em vazio V_0 e impedância interna Z_g .

Como vimos anteriormente, a tensão e corrente ao longo da linha resultam da interferência das ondas que se propagam do gerador para a carga, que designaremos por **ondas incidentes**, com as ondas que são refletidas no terminal de carga e se propagam da carga para o gerador. Denominaremos estas ondas por **ondas refletidas**.

A determinação das constantes faz-se a partir das condições-fronteira no fim da linha, e que são a continuidade da tensão e corrente em $z = \ell$.

Em regime alternado sinusoidal tomaremos:

$$\begin{aligned}\bar{V}(\ell) &= \bar{V}_2 \\ \bar{I}(\ell) &= \bar{I}_2 = \bar{V}_2 / \bar{Z}_s\end{aligned}$$

(continuação)

de onde:

$$P_{a1} = 6.06 \text{ (kW)}$$

o que confirma o resultado anterior, sendo a pequena discrepância devida a erros de aproximação (especialmente introduzidos ao utilizar as fórmulas de Friis).

7.4.8.4 Largura de banda

A largura de banda de uma antena está associada à gama de frequência onde a antena satisfaz um dado conjunto de especificações. Designando por f_1 e f_2 , respetivamente, as frequências inferior e superior da banda, sendo f_0 a frequência central, a largura de banda percentual é definida por:

$$LB \% = \frac{f_2 - f_1}{\sqrt{f_1 f_2}} \times 100 \approx \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100 \quad (7.36)$$

Como a frequência de trabalho influencia vários fatores, tais como o diagrama de radiação, ganho, polarização e impedância da antena, não existe um critério único para definir a largura de banda. Assim:

- Em antenas a funcionar em modo emissor, o critério predominante é o valor do coeficiente de onda estacionária, p , na linha ou no guia de alimentação: $p \leq 1.5$ para emissores com potência superior a 50 W, podendo ser mais elevado (2 a 2.5) para potências inferiores;
- Em receção, o critério limitador da largura de banda pode ser o valor de C_i , ou seu equivalente.



-
- Dipolo Elétrico de Hertz (DEH)
 - Dipolo Elétrico Curto (DEC)
 - Antenas lineares
 - Monopolos
 - Agregados de antenas
 - Antena em recepção
-

8.1 Introdução

As antenas são elementos que fazem a transição entre a propagação guiada que ocorre numa linha de transmissão ou guia de ondas, para ondas que se propagam em espaço livre, geralmente através do ar. A forma e as dimensões das antenas determinam a direção e a quantidade de energia radiada. A polarização da antena define-se como a polarização das ondas radiadas por ela, quando usada em emissão. A configuração e dimensões da antena condicionam também o modo como as ondas eletromagnéticas são captadas pelas antenas, quando usadas em recepção.

As primeiras antenas foram construídas por Heinrich Hertz em 1886, para provar a existência de ondas eletromagnéticas, previstas por J. C. Maxwell. H. Herz usou uma antena dipolar em emissão e uma antena de espira em recepção. Estas antenas são apresentadas na Figura 8.1.

8.11 Antenas inteligentes (*Smart antennas*)

Atualmente, nos sistemas de comunicação *sem fios* (*wireless*) existem dois grupos principais de antenas: as antenas omnidirecionais e as antenas direcionais.

As antenas omnidirecionais apresentam diagramas de radiação de forma toroidal. Em ambientes interiores são usados dipolos e antenas omnidirecionais, normalmente encontrados em pontos de acesso e *routers*. Nos ambientes exteriores, são utilizadas antenas omnis individualmente ou em agregados.

As antenas orientáveis, tal como o nome indica, focam o sinal numa direção específica, limitando a área abrangida pelos sinais que emitem. Neste tipo de antenas estão incluídas as antenas Yagi-Uda, *patches*, parabólicas e antenas de abertura (Orfanidis, 2008; Balanis e Ioannides, 2007)..

Os sistemas sem fios são suscetíveis a erros, provenientes da propagação multipercurso e da interferência de sinais existentes no meio (Kalis et al., 2014). A relação sinal ruído, SINR (*signal to interference plus noise ratio*), pode ser melhorada se forem utilizadas antenas de diretividade variável. Num agregado de fase (*phased array*), existe a capacidade de poder variar a sua diretividade eletronicamente. Contudo, é difícil construir uma antena compacta deste tipo, pois o espaçamento entre elementos é de cerca de meio comprimento de onda. Para além disso, se o espaçamento entre elementos for reduzido, a excitação destes não pode ser controlada individualmente, uma vez que o acoplamento mútuo entre elementos torna-se muito intenso (Kawakami e Ohira, 2005; Silva, 2014).

Na década de 1970, houve um avanço importante nos agregados de antenas, com o aparecimento dos agregados com processamento digital incorporado (Schlub e Ohira, 2003), conhecidos por antenas inteligentes (*smart antennas*).

O acoplamento mútuo entre a antena ativa e as antenas parasitas, juntamente com a utilização de componentes eletrónicos, tem sido usado para criar antenas inteligentes denominadas de *Switched Parasitic Arrays* (SPA). Os SPA não permitem controlar o diagrama de radiação, apenas permitem criar um número finito de diagramas de radiação predefinidos. Para que seja possível alterar os diagramas de radiação é necessário a existência de impedâncias

Quadro A.6 Alfabeto grego		
Nome	Minúscula	Maiúscula
Alfa	α	A
Beta	β	B
Gama	γ	Γ
Delta	δ	Δ
Épsilon	ε	E
Zeta	ζ	Z
Eta	η	H
Seta	θ	Θ
Iota	ι	I
Capa	κ	K
Lambda	λ	Λ
Miú	μ	M
Niú	ν	N
Csi	ξ	Ξ
Ómicron	$\omicron$	O
Pi	π	Π
Ró	ρ	P
Sigma	σ	Σ
Tau	τ	T
Upsilon	υ	Y
Fi	φ	Φ
Qui	χ	X
Psi	ψ	Ψ
Ómega	ω	Ω

PROPAGAÇÃO E RADIAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

2.^a edição

Este livro introduz os princípios físicos que regem a propagação e radiação de ondas eletromagnéticas, fazendo a ligação entre os aspetos teóricos e as aplicações práticas no domínio das telecomunicações.

Os vários temas abordados incluem os **sistemas de propagação guiada**, como as linhas bifilares e os cabos coaxiais, passando pelos **guias metálicos planares** e **guias ocos** com várias geometrias, e terminando nas **fibras óticas**. No âmbito da radiação, é feita uma introdução aos conceitos básicos associados aos sistemas radiadores, sendo estudadas as **antenas de onda estacionária**, bem como os **agregados de antenas**. Nesta 2.^a Edição, além de **diversos aperfeiçoamentos**, foi incluído no final do último capítulo uma breve introdução às **antenas inteligentes** (*smart antennas*), um desenvolvimento recente.

Os conceitos teóricos são sempre acompanhados de **interpretação física**, que permite apreender os seus aspetos essenciais, bem como o domínio de validade das aproximações efetuadas.

Ao longo do texto são apresentados diversos **problemas resolvidos**, incluindo-se, no fim de cada capítulo, um conjunto de questões que permitem aferir da compreensão da matéria apresentada, bem como **problemas propostos com as respetivas soluções**.

Este livro destina-se a estudantes de Engenharia Eletrotécnica, nos seus vários ramos de especialização (Eletrónica, Telecomunicações, Controlo e Robótica, Energia e Sistemas de Potência), **proporcionando-lhes uma base sólida no domínio da propagação e radiação de ondas eletromagnéticas, que lhes permite adquirir os conceitos-base necessários para aplicações mais avançadas**.

Os temas tratados incluem:

- Propagação em meios ilimitados
- Reflexão e transmissão em superfícies planas
- Guias planares metálicos, guias metálicos ocos e cavidades ressonantes
- Linhas de transmissão
- Fibras óticas
- Antenas lineares e agregados
- Antenas inteligentes

Inclui glossário de termos correspondentes entre o português europeu e o português do Brasil.



ISBN 978-989-752-332-8



www.lidel.pt