

Fundamentos de Redes de Computadores

Ilustrados com Base na Internet e nos
Protocolos TCP/IP
(Versão 0.95)

José Legatheaux Martins

Departamento de Informática
da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Março de 2017

Endereço do autor:

José Legatheaux Martins
Departamento de Informática
da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa
Quinta da Torre
2829-516 Monte da Caparica,
PORTUGAL

Email do autor: `jose.legatheaux at fct.unl.pt`

Site do autor: `http://jose.legatheaux.info`

Site do livro: `http://book.legatheaux.info`

Copyright © 2017 - José Legatheaux Martins
Todos os direitos reservados.

Dedicado à Edite e à Inês.

Prefácio

Este livro nasceu da ambição de fornecer um suporte adequado ao ensino e estudo do tema de redes de computadores por estudantes universitários de Engenharia Informática, ou outras pessoas que procuram perceber como as redes funcionam e suportam os sistemas informáticos. Ele destina-se essencialmente àqueles que estudam e praticam a Engenharia Informática e que necessitam de compreender profundamente como funciona uma rede de computadores.

As aplicações informáticas são hoje em dia construídas predominantemente como um sistema formado por componentes distribuídas, que se coordenam entre si para providenciar o serviço final aos utilizadores. O suporte desses sistemas são redes de computadores que permitem a comunicação e coordenação dessas componentes.

A forma como a rede funciona tem um impacto decisivo sobre a arquitectura e o desempenho dos sistemas e aplicações informáticas e influencia a sua arquitectura. Por outro lado, as características dos sistemas informáticos influenciaram decisivamente a forma como a rede é construída, está organizada e funciona. Assim, as necessidades e características dos sistemas e aplicações estão no centro da acção. Entre as necessidades dos sistemas informáticos desempenham um papel primordial o desempenho e a flexibilidade. Por isso a rede tem ela própria de ter um bom desempenho e uma arquitectura flexível e extensível. Entre as características dos dispositivos computacionais, a sua elevada capacidade computacional e a possibilidade de executarem inúmeros algoritmos, influenciaram também decisivamente as redes de computadores, conduzindo àquilo que alguns chamaram a “rede estúpida”.

Durante muitos anos o ponto de vista usado no ensino das redes de computadores foi o de que os sistemas de telecomunicações eram o ponto de partida e influenciavam directamente o que era ou não possível fazer a nível das aplicações. Por isso o funcionamento das aplicações vinha em último lugar, e usava-se predominantemente uma abordagem de “baixo para cima” (*bottom-up*), com uma grande ênfase nos suportes e tecnologias de comunicação que, de alguma forma, acabavam por tudo condicionar. Os protocolos TCP/IP eram introduzidos nessas abordagens apenas como um exemplo entre muitas outras, não como actores principais.

Com o progresso das redes e das suas aplicações, este ponto de vista, que também usei durante vários anos de ensino, tornou-se pouco interessante para os estudantes de Engenharia Informática do Séc. XXI e está desfasado dos objectivos da sua formação. A evolução das próprias redes tornaram obsoletas várias tecnologias de comunicações que preencheram (demasiado ?) espaço nessa formação.

Por volta do ano 2000 James Kurose e Keith Ross introduziram uma outra forma de ensinar redes de computadores Kurose and Ross [2013], baseada numa abordagem que estudava primeiro os níveis superiores das redes de computadores e as aplicações mais conhecidas, numa forma que passou a designar-se por de “cima para baixo” (*top-*

down), que também adoptei no ensino de licenciatura.

A minha reflexão e experiência de mais de 25 anos de ensino do tema levaram-me, no entanto, a considerar que uma abordagem que seguisse estritamente, de “baixo para cima” ou vice-versa, aquilo que se convencionou chamar os níveis OSI (*Open Systems Interconnection*), não era assim tão importante, tanto mais que esses níveis se vão cada vez mais influenciando mutuamente e interpenetrando, e já não são assim tão estanques e determinantes para se perceberem muitas das aplicações modernas das redes (*e.g.*, a distribuição adaptativa de vídeo a pedido sobre HTTP, ...). Por isso, tentar perceber como a rede é usada, não pode hoje em dia deixar de considerar como central a forma como os sistemas distribuídos se organizam para tirarem todo o partido das redes.

Por isso preferi relaxar esse tipo de percurso rígido e seguir uma aproximação mais do tipo “saltar para dentro da piscina”. Mas que obviamente continua a respeitar de alguma forma certas camadas essenciais da organização da rede, mas mais relacionadas com o local onde residem o software e os algoritmos fundamentais para resolverem os problemas. É o que de mais parecido consigo fazer com algo que poderia ser descrito como uma aproximação “dirigida aos problemas”. Por outro lado, as facetas mais ligadas a telecomunicações vão sendo introduzidas na justa medida das necessidades da compreensão do impacto das suas características nos níveis superiores das redes, e não são sequer objecto de estudo per si.

Foi a visão desta necessidade que foi decisiva para começar, e me deu coragem para continuar, a longa tarefa de escrever este livro. Até então, pensava que não valia a pena escrever um livro sobre um tema versado de forma tão brilhante por vários autores de grande qualidade, como por exemplo: [Tanenbaum and Wetherall, 2011; Peterson and Davies, 2012; Kurose and Ross, 2013; Marsic, 2013] e [Stallings, 2013], só para citar os suportes bibliográficos que mais frequentemente usei.

Esta tarefa é um alvo em movimento e que, acredito, não terminou ainda. Por um lado não tive ainda tempo de introduzir o tratamento de questões fundamentais como a segurança e a mobilidade (só parcialmente abordadas de forma transversal em alguns capítulos). Por outro lado seria desejável aprofundar alguns aspetos suplementares em algumas das partes do livro. Finalmente, é inevitável que espero ter a oportunidade de corrigir os erros e as gralhas que ainda possam estar presentes nesta versão.

Utilizações esperadas

A maioria dos capítulos deste livro dão suporte ao ensino e aprendizagem sobre redes de computadores ao nível de licenciatura. Não são usados formalismos ou teorias que possam constituir uma barreira à sua utilização ao nível dos primeiros anos de diferentes contextos de ensino universitário ou politécnico.

De qualquer forma dois factores impedem provavelmente a sua utilização logo no primeiro ano. Por um lado é dada uma ênfase algorítmica ao tratamento dos temas, são apresentados muitos algoritmos e sugerida a realização de programas logo desde a primeira parte, pelo que é necessário algum domínio da programação.

No entanto, o aspecto principal que recomenda a sua utilização numa fase mais avançada da formação, tem a ver com a necessidade de o estudante ser capaz de raciocinar em termos de abstrações, interfaces e de organização de sistemas. Uma aptidão que só se adquire após algum treino e relega o estudo das redes de computadores mais para o final do segundo, ou para o início do terceiro ano de estudos superiores.

Vários capítulos ou partes de capítulos destinam-se a um estudo mais avançado, no final da licenciatura ou no início de um mestrado. No entanto, desse ponto de vista, faltam tratar vários tópicos que, não sendo de investigação, são temas importantes que devem ser abordados a esse nível e que estão ausentes desta versão do livro, nomeadamente: redes baseadas em túneis (*e.g.*, MPLS, LISP e outros), desempenho e optimização da rede, qualidade de serviço, redes de centros de dados, *software defined networking*, *etc.*

O livro também é adequado para auto-estudo ou para suporte da formação de técnicos de redes de computadores, pois está escrito com bastantes preocupações pedagógicas e de clareza. No entanto, se é bom para a compreensão dos fundamentos e do que “está por detrás da superfície visível”, tem de ser complementado, quando o objectivo é o treino na utilização das tecnologias, com outras referências que contenham exemplos de como na prática as redes são construídas e os equipamentos parametrizados. Sempre que relevante, essas referências bibliográficas complementares também são fornecidas.

Estrutura do livro

Como referido acima, este livro está estruturado em torno de grandes temas ou partes.

Parte I - Introdução – O todo e as partes

Esta parte do livro apresenta uma panorâmica da forma como estão organizadas, quais são as componentes fundamentais e os princípios e principais modelos que estão na base das redes de computadores. O domínio desta parte é imprescindível a qualquer estudante, não obstante incluir alguns aspectos no Capítulo 4 que podem ser dispensados numa primeira abordagem. Ela é constituída pelos seguintes capítulos:

Capítulo 1. Como funciona uma rede de computadores. Este capítulo apresenta uma panorâmica geral do que é uma rede de computadores, como funciona e como permite o funcionamento dos diferentes tipos de aplicações.

Capítulo 2. Canais de dados. Este capítulo apresenta uma introdução aos canais de dados, como podem ser caracterizados qualitativa e quantitativamente, como são construídos, e apresenta ainda um exemplo preliminar do funcionamento concreto de um dos mais populares canais de dados, os canais Ethernet.

Capítulo 3. Comutação de circuitos e de pacotes. Este capítulo mostra porque as primeiras redes de telecomunicações se baseavam na comutação de circuitos e evoluíram posteriormente para a comutação de pacotes. Discute as características das redes de pacotes, como funcionam e como podem ser caracterizadas através de propriedades quantitativas.

Capítulo 4. Princípios, modelos e ferramentas. Este capítulo discute os princípios fundamentais que presidiram ao desenvolvimento das redes de computadores modernas, os principais modelos utilizados para as compreender e estudar, e finalmente discute quais são as ferramentas usadas para desenhar redes concretas, para medir e estudar as suas propriedades, ou ainda para simulá-las ou emulá-las.

Capítulo 5. Programação com Sockets em Java. Apresenta, através de exemplos, uma introdução à interface de programação sistema (API) para aceder aos serviços da rede num sistema de operação moderno em Java.

Parte II - Transferência de dados

Esta parte do livro discute os métodos usados para transferir dados entre dispositivos computacionais ligados através de uma rede, e põe em evidência como esses métodos se devem adaptar ao contexto e às necessidades das aplicações. Trata-se de um capítulo que noutros livros se poderia chamar “Transporte” mas que inclui também facetas aplicacionais que interferem directamente com a transferência de dados. Esta parte é constituída pelos seguintes capítulos:

Capítulo 6. Fiabilidade com base em retransmissão. Este capítulo introduz os métodos e protocolos fundamentais usados para transferir dados com base na retransmissão dos pacotes que se perderam, ou que foram corrompidos pela rede.

Capítulo 7. O protocolo TCP. É o principal protocolo de transferência de dados usado na Internet, e que usa alguns dos métodos e algoritmos apresentados no capítulo anterior.

Capítulo 8. Controlo da saturação da rede. Quando a quantidade de pacotes que entram na rede é superior à que esta consegue encaminhar, a qualidade de serviço extremo a extremo degrada-se. No entanto, se o software dos sistemas em comunicação cooperar, é possível encontrar uma solução do tipo “win-win”.

Capítulo 9. Transporte de dados multimédia. Os dados multimédia podem ser transportados com perda de resolução, envolvendo mais intimamente as aplicações no transporte dos mesmos. Por outro lado, são às vezes usados em cenários (*e.g.*, *multicasting*) em que é preferível usar métodos de correção das faltas através do envio de informação redundante.

Capítulo 10. Outros protocolos de transferência de dados. Este capítulo introduz diversas alternativas de protocolos de transporte. Trata-se de um capítulo complementar que usa um estilo mais adequado para um estudante com autonomia para realizar estudos complementares.

Parte III - Aplicações – Protocolos e sistemas de suporte

Esta parte do livro apresenta um conjunto de mecanismos e princípios em que as redes e os sistemas que a utilizam se cruzam e influenciam mutuamente. Ela é constituída pelos seguintes capítulos:

Capítulo 11. Nomes e endereços. Para além de introduzir estes conceitos e as suas variantes, discute os mecanismos usados para realizar o mapeamento de entidades dos diferentes níveis de designação e introduz o DNS (*Domain Name System*).

Capítulo 12. O protocolo HTTP. O protocolo HTTP (*Hyper Text Control Protocol*) é um protocolo genérico de transferência de objectos, do tipo cliente / servidor, que inclui um conjunto de funcionalidades extensíveis para adaptação do mesmo às necessidades dos diferentes tipos de aplicações. É dada bastante ênfase à problemática do *caching*, extensibilidade e implicações da segurança do protocolo.

Capítulo 13. Redes de distribuição de conteúdos. As aplicações de maior escala usadas hoje em dia são suportadas no protocolo HTTP mas também num conjunto de servidores e princípios arquitecturais que conduziram à construção de um novo tipo de redes, ditas redes sobrepostas (*overlay networks*) ou lógicas. O capítulo discute a organização dos principais protocolos e redes de distribuição de conteúdos, quer os baseados em infraestruturas de centros de dados e *reverse caches*, quer os baseados em sistemas cooperativos (P2P). Boa parte deste capítulo não contém material obrigatório numa primeira introdução.

Parte IV - Redes de pacotes

Esta parte do livro discute de forma detalhada o funcionamento interno de uma rede de pacotes. Segue-se o princípio de tentar resolver os problemas de forma o mais simples que possível, passando apenas a soluções mais complexas quando as anteriores deixaram de ser possíveis. Ela é constituída pelos seguintes capítulos:

Capítulo 14. Redes baseadas em canais de difusão. Um canal baseado em difusão permite construir imediatamente a mais simples de todas as redes. O capítulo discute também em detalhe as tecnologias IEEE 802.3 (Ethernet com fios) e 802.11 (Wi-Fi).

Capítulo 15. Encaminhamento com base em inundação. É relativamente fácil fazer uma rede capaz de encaminhar pacotes baseada no algoritmo de inundação. O mesmo também pode ser usado para difundir dados de forma fiável. Depois o capítulo introduz as redes comutadas baseadas em *switches* Ethernet e os algoritmos e protocolos complementares por estas usados.

Capítulo 16. Encaminhamento pelo caminho mais curto. Quando as soluções anteriores não são aplicáveis, é necessário passar a soluções mais complexas. Uma solução de compromisso consiste em usar encaminhamento pelo caminho mais curto, cujos algoritmos são apresentados em detalhe. É feita uma breve referência aos protocolos que usam este tipo de algoritmos.

Capítulo 17. Interligação de redes - protocolo IP. O protocolo IP proporciona uma interface e uma camada de abstracção para os diferentes tipos de redes e é a “cola” da Internet. Por cima dele tudo pode mudar, e por baixo dele a diversidade também é a regra geral. Neste capítulo estuda-se este protocolo nas versões 4 e 6, como é organizado o endereçamento numa rede IP e como esta funciona no concreto.

Capítulo 18. Encaminhamento na Internet global. Quando uma rede interliga biliões de sistemas terminais através de milhões de comutadores de pacotes e envolve milhares de operadores independentes e em competição, mas unidos pelo objectivo de proporcionar conectividade completa, é necessário passar a um nível superior de organização. O capítulo introduz também o protocolo BGP e uma parte razoável da sua complexidade.

Todos os capítulos terminam sempre com duas secções. A primeira chama-se **Resumo e referências** e contém um resumo do capítulo, muitas vezes baseado na repetição das caixas de resumos parciais das diferentes secções do capítulo, a lista dos termos introduzidos, incluindo a sua definição, um conjunto de referências bibliográficas complementares, assim como apontadores para *sites* com informação relevante para o tema do capítulo.

A segunda chama-se **Questões para revisão e estudo** e contém um conjunto de questões para ajuda à revisão da matéria do capítulo e treino da sua compreensão.

Como o livro pode ser usado para ensino e estudo

Numa primeira disciplina de licenciatura de redes de computadores habitualmente uso os materiais correspondentes aos seguintes capítulos:

Parte I - Introdução. Capítulo 1, Capítulo 2, Capítulo 3 e as primeiras quatro secções do Capítulo 4. O Capítulo 5 é introduzido em função das necessidades, durante as aulas laboratoriais.

Parte II - Transferência de dados. Capítulo 6, Capítulo 7, as primeiras três secções do Capítulo 8, e o Capítulo 9 sem a Secção 9.3.

Parte III - Protocolos e sistemas de suporte das aplicações. Capítulo 11, Capítulo 12 e o início do Capítulo 13.

Parte IV - Redes de pacotes. Capítulo 14, as duas primeiras secções do Capítulo 15, Capítulo 16 e Capítulo 17. É feita uma breve referência ao tema do Capítulo 18.

Este conjunto de matérias deve ser complementado com um capítulo sobre segurança caso a mesma não seja coberta noutra disciplina do mesmo curso.

Alguns capítulos contém tópicos que habitualmente apenas trato em disciplinas de mestrado. Nomeadamente os seguintes: as últimas três secções do Capítulo 4, as duas últimas secções do Capítulo 8, a Secção 4 do Capítulo 9. O Capítulo 10. Boa parte do Capítulo 13. A terceira e quarta secções do Capítulo 15 e praticamente todo o Capítulo 18.

Do uso da língua portuguesa e de termos em inglês

Os profissionais que trabalham em redes de computadores têm por hábito, mesmo quando a sua língua de trabalho não é a língua inglesa, utilizarem muitos termos em inglês. Em contrapartida, os académicos portugueses têm por dever fomentar a correcta utilização da língua portuguesa num contexto técnico e científico quando esta é a língua de trabalho.

Este livro está escrito em português e por isso existe a preocupação de utilizar os termos adequados dessa língua para designar os conceitos, mecanismos e dispositivos usados na área de redes de computadores. No entanto, procura-se referir em todos os casos os termos tradicionalmente usados em língua inglesa, para ajudar o leitor a situar-se num contexto em que sejam utilizados predominantemente os termos na língua inglesa.

No entanto, esta opção não é aplicada de forma radical e por isso, quando se descreve um mecanismo muito ligado a uma norma tecnológica que só existe escrita na língua inglesa, ou se refere um conceito para o qual é difícil introduzir um termo em português, optei por usar o termo na língua inglesa impresso em itálico. Em cada caso a opção está justificada.

Por outro lado, sempre que são apresentados extractos de programas ou algoritmos em pseudo-código, dada a utilização de palavras chave em inglês, os comentários e nomes de variáveis também estão em inglês para manter a uniformidade.

O livro utiliza a ortografia do português na sua versão de antes do último acordo ortográfico.

Agradecimentos

Este livro não teria sido possível sem a colaboração de diversos colegas e das instituições universitárias nas quais desempenhei ou desempenho funções.

Uma primeira palavra de agradecimento é devida ao Departamento de Informática e à Faculdade de Ciências e Tecnologia por me terem libertado de leccionar aulas durante dois semestres, o que me permitiu dispor do tempo necessário para escrever a sua primeira versão.

Um grande agradecimento também é devido aos colegas: Henrique João Domingos, João Magalhães, Nuno Preguiça, Paulo Lopes, Pedro Medeiros, Sérgio Marco Duarte e Vitor Duarte, com quem partilhei durante vários anos o desafio de ensinar a estudantes dos cursos de licenciatura e mestrado em Engenharia Informática as matérias de redes de computadores, em diversas disciplinas, primeiro na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e depois na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Agradeço igualmente a todas as pessoas que contribuíram com observações e revisões de partes deste texto, nomeadamente: Carmen Morgado, Cecília Gomes, Henrique João Domingos, João Leitão, Mário de Almeida, Nuno Preguiça, Paulo Lopes, Ricardo Martins, Sérgio Marco Duarte e Vitor Duarte.

Agradeço igualmente aos autores dos inúmeros clips que utilizei nas figuras e que os colocaram à disposição do público para utilização sem constrangimentos via o *site* <https://openclipart.org>.

Monte da Caparica, Fevereiro de 2017

José Legatheaux Martins
<http://jose.legatheaux.info>

Conteúdo

I	Introdução – O todo e as partes	1
1	Como funciona uma rede de computadores	5
1.1	O que é uma rede de computadores	5
1.2	Interligação de redes - a rede Internet	11
1.3	Divisão de responsabilidades na rede	14
1.4	Aplicações suportadas no protocolo TCP	19
1.5	Aplicações suportadas no protocolo UDP	23
1.6	Interfaces de rede	29
1.7	Organismos de normalização e governação	33
1.8	Resumo e referências	36
1.9	Questões para revisão e estudo	38
2	Canais de dados	43
2.1	Definição de canal de comunicação	44
2.2	Caracterização quantitativa dos canais	48
2.3	Exemplos de meios de comunicação	53
2.4	Detecção de erros	59
2.5	Exemplo – canais Ethernet	65
2.6	Resumo e referências	69
2.7	Questões para revisão e estudo	71
3	Comutação de circuitos e de pacotes	75
3.1	Comutação de circuitos	77
3.2	Comutação de pacotes	81
3.3	Tempo de trânsito extremo a extremo	85
3.4	Como viver com o <i>jitter</i>	91
3.5	Comparação entre os dois modelos	94
3.6	Indicadores de desempenho	95
3.7	Resumo e referências	96
3.8	Questões para revisão e estudo	99
4	Princípios, modelos e ferramentas	105
4.1	Princípios	106
4.2	Segurança e controlo de acesso e de recursos	112
4.3	Neutralidade da rede	115
4.4	Modelos	117

4.5	Análise e avaliação do desempenho	127
4.6	Resumo e referências	132
4.7	Questões para revisão e estudo	135
5	Programação com Sockets em Java	139
5.1	Utilização de sockets UDP em Java	140
5.2	Comunicação multi-ponto – Sockets Multicast	151
5.3	Sockets Java para canais TCP	156
5.4	Resumo e referências	164
5.5	Questões para revisão e estudo	166
II	Transferência de dados	171
6	Fiabilidade com base em retransmissão	175
6.1	Mecanismos de base	176
6.2	Protocolo <i>stop & wait</i>	181
6.3	Protocolos de janela deslizante	184
6.4	Protocolos e máquinas de estado com acções	198
6.5	Resumo e referências	199
6.6	Questões para revisão e estudo	202
7	O protocolo TCP	209
7.1	A interface do protocolo TCP	210
7.2	Descrição do protocolo	212
7.3	Abertura e fecho das conexões	223
7.4	Resumo e referências	231
7.5	Questões para revisão e estudo	235
8	Controlo da saturação da rede	239
8.1	Em que consiste a saturação	241
8.2	Como controlar a saturação	246
8.3	Controlo da saturação no protocolo TCP	250
8.4	Controlo com <i>feedback</i> explícito	259
8.5	Equidade e desempenho do TCP	265
8.6	Resumo e referências	273
8.7	Questões para revisão e estudo	277
9	Transporte de dados multimédia	281
9.1	Codificação de informação multimédia	282
9.2	Transporte sobre TCP e sobre UDP	290
9.3	Tratamento de erros em fluxos multimédia	295
9.4	RTP – <i>Real-time Transport Protocol</i>	300
9.5	Resumo e referências	303
9.6	Questões para revisão e estudo	307
10	Outros protocolos de transferência de dados	309
10.1	Datagram Congestion Control Protocol	310
10.2	Stream Control Transmission Protocol	311
10.3	Multi-Path TCP	313
10.4	<i>Middleboxes</i> e “ossificação” da Internet	314
10.5	Propostas para aprofundamento	316

III Aplicações – Protocolos e sistemas de suporte 317

11 Nomes e endereços 321

- 11.1 Nomes, endereços e identificadores 322
- 11.2 O DNS (*Domain Name System*) 325
- 11.3 Organização e funcionamento 330
- 11.4 Resumo e referências 343
- 11.5 Questões para revisão e estudo 346

12 O protocolo HTTP 353

- 12.1 Funcionamento 355
- 12.2 Desempenho 365
- 12.3 O protocolo HTTP e a Web actual 371
- 12.4 Resumo e referências 378
- 12.5 Questões para revisão e estudo 381

13 Redes de distribuição de conteúdos 385

- 13.1 Servidores *proxies* de HTTP 386
- 13.2 Distribuição de carga de acessos HTTP 389
- 13.3 CDNs com infra-estrutura dedicada 395
- 13.4 Distribuição P2P de conteúdos 401
- 13.5 Resumo e referências 411
- 13.6 Questões para revisão e estudo 414

IV Redes de pacotes 419

14 Redes baseadas em canais de difusão 425

- 14.1 Requisitos e possíveis soluções 428
- 14.2 Canais de dados Ethernet (IEEE 802.3) 434
- 14.3 Canais de dados Wi-Fi (IEEE 802.11) 440
- 14.4 Resumo e referências 451
- 14.5 Questões para revisão e estudo 453

15 Encaminhamento com base em inundação 457

- 15.1 Encaminhamento com base em inundação 458
- 15.2 Comutação Ethernet (Ethernet *switching*) 464
- 15.3 Árvores de cobertura e STP 466
- 15.4 Virtual Local Area Networks (VLANs) 473
- 15.5 Resumo e referências 477
- 15.6 Questões para revisão e estudo 480

16 Encaminhamento pelo caminho mais curto 489

- 16.1 Encaminhamento: o problema e uma solução 490
- 16.2 Determinação de caminhos mais curtos 492
- 16.3 Encaminhamento pelo estado dos canais 497
- 16.4 Encaminhamento pelo algoritmo Bellman-Ford 507
- 16.5 Resumo e referências 517
- 16.6 Questões para revisão e estudo 521

17 Interligação de redes - protocolo IP	531
17.1 A Internet e o endereçamento IP	532
17.2 IP versão 4 e IP versão 6	544
17.3 Encaminhamento de pacotes IP	549
17.4 Protocolos auxiliares do IP	555
17.5 Resumo e referências	565
17.6 Questões para revisão e estudo	568
18 Encaminhamento na Internet global	577
18.1 Os problemas da escala	577
18.2 Sistemas autónomos	579
18.3 Protocolo BGP	589
18.4 Resumo e referências	602
18.5 Questões para revisão e estudo	605
Bibliografia	613