
Capítulo 1

Redes de computadores e a Internet



A Internet de hoje é provavelmente o maior sistema de engenharia já criado pela humanidade, com centenas de computadores conectados, links de comunicação e comutadores; centenas de milhares de usuários que se conectam esporadicamente por meio de telefones celulares e PDAs; e dispositivos como sensores, webcams, console para jogos, quadros de imagens, e até mesmo máquinas de lavar sendo conectadas à Internet. Dado que a Internet é tão ampla e possui inúmeros componentes e utilidades, há a possibilidade de compreender como ela (e, em um amplo sentido, as redes de computadores) funciona? Existem princípios de orientação e estrutura que forneçam um fundamento para a compreensão de um sistema surpreendentemente complexo e abrangente? Se a resposta for sim, é possível que, nos dias de hoje, seja interessante e divertido aprender sobre rede de computadores? Felizmente, as respostas para todas essas perguntas é um retumbante SIM! Na verdade, nosso objetivo neste livro é fornecer uma introdução moderna ao campo dinâmico das redes de computadores, apresentando os princípios e o entendimento prático necessários para utilizar não apenas as redes de hoje, como também as de amanhã.

O primeiro capítulo apresenta um panorama de redes de computadores e da Internet. Nossa objetivo é pintar um quadro amplo que nos permita ver a floresta por entre as árvores. Cobriremos um terreno bastante extenso neste capítulo de introdução e discutiremos várias peças de uma rede de computadores, sem perder de vista o quadro geral. Este capítulo lança as fundações para o restante do livro.

O panorama geral de redes de computadores que apresentaremos neste capítulo será estruturado como segue. Após apresentarmos brevemente a terminologia e os conceitos fundamentais, examinaremos primeiramente os componentes básicos de hardware e software que compõem uma rede. Partiremos da periferia da rede e examinaremos os sistemas finais e aplicações de rede executados nela. Consideraremos os serviços de transporte fornecidos a essas aplicações. Em seguida exploraremos o cerne de uma rede de computadores examinando os enlaces e comutadores que transportam dados, bem como as redes de acesso e meios físicos que conectam sistemas finais ao núcleo da rede. Aprenderemos que a Internet é uma rede de redes e observaremos como essas redes se conectamumas com as outras.

Após concluirmos essa revisão sobre a periferia e o núcleo de uma rede de computadores, adotaremos uma visão mais ampla e mais abstrata na segunda metade deste capítulo. Examinaremos as causas do atraso de transferência de dados e das perdas em uma rede de computadores e forneceremos modelos quantitativos simples para o atraso sim a sim, modelos que levam em conta atrasos de transmissão, propagação e fila. Depois apresentaremos

alguns princípios fundamentais de arquitetura em redes de computadores, a saber: protocolos em camadas e modelos de serviço. Aprenderemos, também, que as redes de computadores são vulneráveis a diferentes tipos de ameaças; analisaremos algumas dessas ameaças e como a rede de computadores pode se tornar mais segura. Finalmente, encerraremos este capítulo com um breve histórico da computação em rede.

1.1 O que é a Internet?

Neste livro, usamos a Internet pública, uma rede de computadores específica, como o veículo principal para discutir as redes de computadores e seus protocolos. Mas o que é a Internet? Há diversas maneiras de responder a essa questão. Primeiro, podemos descrever detalhadamente os aspectos principais da Internet, ou seja, os componentes de software e hardware básicos que a formam. Segundo, podemos descrever a Internet em termos de uma infraestrutura de redes que fornece serviços para aplicações distribuídas. Iniciaremos com a descrição dos componentes, utilizando a Figura 1.1 como ilustração para a nossa discussão.

1.1.1 Uma descrição dos componentes da rede

A Internet é uma rede de computadores que interconecta milhares de dispositivos computacionais ao redor do mundo. Há pouco tempo, esses dispositivos eram basicamente computadores de mesa, estações de trabalho Linux, e os assim chamados servidores que armazenam e transmitem informações, como páginas da Web e mensagens de e-mail. No entanto, cada vez mais sistemas finais modernos da Internet, como TVs, laptops, consoles para jogos, telefones celulares, webcams, automóveis, dispositivos de sensoriamento ambiental, quadros de imagens, e sistemas internos elétricos e de segurança, estão sendo conectados à rede. Realmente, o termo *rede de computadores* está começando a soar um tanto desatualizado, dados os muitos equipamentos não tradicionais que estão sendo ligados à Internet. No jargão da Internet, todos esses equipamentos são denominados hospedeiros ou sistemas finais. Em julho de 2008, havia aproximadamente 600 milhões de sistemas finais ligados à Internet [ISC, 2009], sem contar os telefones celulares, laptops e outros dispositivos que são conectados à rede de maneira intermitente.

Sistemas finais são conectados entre si por enlaces (links) de comunicação e comutadores de pacotes. Na Seção 1.2, veremos que há muitos tipos de enlaces de comunicação, que são constituídos de diferentes tipos de meios físicos, entre eles cabos coaxiais, fios de cobre, fibras ópticas e ondas de rádio. Enlaces diferentes podem transmitir dados em taxas diferentes, sendo a taxa de transmissão de um enlace medida em bits por segundo.

Quando um sistema final possui dados para enviar a outro sistema final, o sistema emissor segmenta esses dados e adiciona bytes de cabeçalho a cada segmento. Os pacotes de informações resultantes, conhecidos como pacotes no jargão de rede de computadores, são enviados através da rede ao sistema final de destino, onde são reagregados aos dados originais.

Um comutador de pacotes encaminha o pacote que está chegando em um de seus enlaces de comunicação de entrada para um de seus enlaces de comunicação de saída. Há comutadores de pacotes de todos os tipos e formas, mas os dois mais proeminentes na Internet de hoje são roteadores e comutadores de camada de enlace (*switches*). Esses dois tipos de comutadores encaminham pacotes a seus destinos finais. Os comutadores de camada de enlace são tipicamente utilizados em redes de acesso, enquanto os roteadores são utilizados principalmente no núcleo da rede. A sequência de enlaces de comunicação e comutadores de pacotes que um pacote percorre desde o sistema final remetente até o sistema final receptor é conhecida como rota ou caminho através da rede. É difícil de estimar a exata quantidade de tráfego na Internet [Odylsko, 2003]. A PriMetrica [PriMetrica, 2009] estima que 10 terabits por segundo de capacidade internacional foram utilizados por provedores da Internet pública em 2008, sendo que essa capacidade duplica, aproximadamente, a cada dez anos.

As redes comutadas por pacotes (que transportam pacotes) são, de muitas maneiras, semelhantes às redes de transporte de rodovias, estradas e cruzamentos (que transportam veículos). Considere, por exemplo, uma fábrica que precise transportar uma quantidade de carga muito grande a algum depósito localizado a milhares de

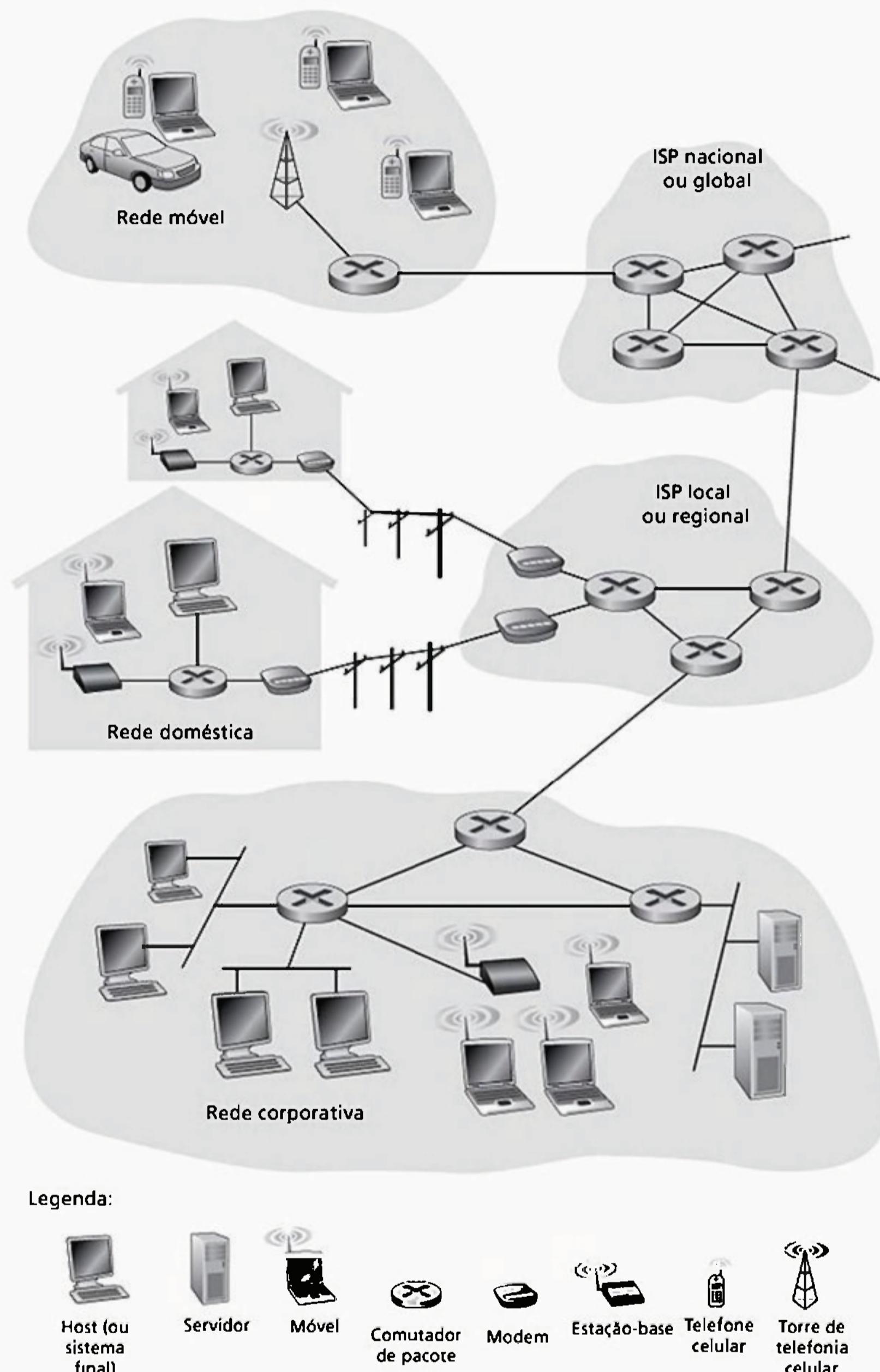


Figura 1.1 Alguns componentes da Internet

quilômetros. Na fábrica, a carga é dividida e carregada em uma frota de caminhões. Cada caminhão viaja, independentemente, pela rede de rodovias, estradas e cruzamentos ao depósito de destino. No depósito, a carga é descarregada e agrupada com o resto da carga pertencente à mesma remessa. Deste modo, os pacotes se assemelham aos caminhões, os enlaces de comunicação se assemelham às rodovias e estradas, os comutadores de pacote se assemelham aos cruzamentos e cada sistema final se assemelha aos prédios. Assim como o caminhão faz o percurso pela rede de transporte, o pacote utiliza uma rede de computadores.

Sistemas finais acessam a Internet por meio de Provedores de Serviços de Internet (Internet Service Providers — ISPs), entre eles ISPs residenciais como empresas de TV a cabo ou empresas de telefonia; ISPs corporativos, ISPs de universidades e ISPs que fornecem acesso sem fio em aeroportos, hotéis, cafés e outros locais públicos. Cada ISP é uma rede de comutadores de pacotes e enlaces de comunicação. ISPs proveem aos sistemas finais uma variedade de tipos de acesso à rede, incluindo acesso por modem discado de 56 kbps, acesso residencial de banda larga como modem de cabo coaxial ou DSL (linha digital de assinante), acesso por LAN de alta velocidade e acesso sem fio. ISPs também fornecem acesso a provedores de conteúdo, conectando sites Web diretamente à Internet. Esta se interessa pela conexão entre os sistemas finais, portanto os ISPs que fornecem acesso a esses sistemas também devem se interconectar. Esses ISPs de nível mais baixo são interconectados por meio de ISPs de nível mais alto, nacionais e internacionais, como AT&T e Sprint. Um ISP de nível mais alto consiste em roteadores de alta velocidade interconectados com enlaces de fibra ótica de alta velocidade. Cada rede ISP, seja de nível mais alto ou mais baixo, é gerenciada de forma independente, executa o protocolo IP (ver adiante) e obedece a certas convenções de nomeação e endereço. Examinaremos ISPs e sua interconexão mais detalhadamente na Seção 1.3.

Os sistemas finais, os comutadores de pacotes e outras peças da Internet executam protocolos que controlam o envio e o recebimento de informações. O TCP (Transmission Control Protocol — Protocolo de Controle de Transmissão) e o IP (Internet Protocol — Protocolo da Internet) são dois dos protocolos mais importantes da Internet. O protocolo IP especifica o formato dos pacotes que são enviados e recebidos entre roteadores e sistemas finais. Os principais protocolos da Internet são conhecidos coletivamente como TCP/IP. Começaremos a examinar protocolos neste capítulo de introdução. Mas isso é só um começo — grande parte deste livro trata de protocolos de redes de computadores!

Dada a importância de protocolos para a Internet, é adequado que todos concordem sobre o que cada um dos protocolos faz. É aqui que os padrões entram em ação. Padrões da Internet são desenvolvidos pela IETF (Internet Engineering Task Force — Força de Trabalho de Engenharia da Internet) [IETF, 2004]. Os documentos padronizados da IETF são denominados RFCs (*request for comments* — pedido de comentários). Os RFCs começaram como solicitações gerais de comentários (por isso o nome) para resolver problemas de arquitetura que a precursora da Internet enfrentava. Os RFCs tendem a ser bastante técnicos e detalhados. Definem protocolos como TCP, IP, HTTP (para a Web) e SMTP (Protocolo Simples de Transferência de Correio — Simple Mail Transfer Protocol) (para e-mail). Atualmente, existem mais de 5.000 RFCs. Outros organismos também especificam padrões para componentes de rede, mas notavelmente para enlaces da rede. O IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee [IEEE, 802, 2009], por exemplo, especifica os padrões Ethernet e Wi-Fi sem fio.

1.1.2 Uma descrição do serviço

A discussão anterior identificou muitos dos componentes que compõem a Internet. Mas também podemos descrevê-la partindo de um ângulo completamente diferente — ou seja, como *uma infraestrutura que provê serviços a aplicações*. Tais aplicações incluem correio eletrônico, navegação na Web, mensagem instantânea, Voz sobre IP (VoIP), Internet via rádio, vídeo em tempo real, jogos distribuídos, compartilhamento de arquivos peer-to-peer (P2P), televisão pela Internet, login remoto e muito mais. Essas aplicações são conhecidas como aplicações distribuídas, uma vez que envolvem diversos sistemas finais que trocam informações mutuamente. De forma significativa, as aplicações da Internet são executadas em sistemas finais — e não em comutadores de pacote no núcleo da rede. Embora os comutadores de pacote facilitem a troca de dados entre os sistemas, eles não estão relacionados com a aplicação, que é a fonte ou destino de dados.

Vamos explorar um pouco mais o significado de uma infraestrutura que fornece serviços a aplicações. Nesse sentido, suponha que você tenha uma grande ideia para uma aplicação distribuída para a Internet, uma que possa beneficiar a humanidade ou que simplesmente o enriqueça e o torne famoso. Como transformar essa ideia em uma aplicação real da Internet? Como as aplicações são executadas em sistemas finais, você precisará criar componentes de software que sejam executados em sistemas finais. Você pode, por exemplo, criar seus componentes em Java, C, ou Python. Agora, já que você está desenvolvendo uma aplicação distribuída para a Internet, os componentes do software executados em diferentes sistemas finais precisarão enviar dados uns aos outros. E, aqui,

chegamos ao assunto principal — o que leva ao modo alternativo de descrever a Internet como uma plataforma para aplicações. De que modo um componente da aplicação, executado em um sistema final, orienta a Internet a enviar dados a outro componente de software executado em outro sistema final?

Os sistemas finais ligados à Internet proveem uma Interface de Programação de Aplicação (API) que especifica como o componente do software que é executado no sistema final solicita à infraestrutura da Internet que envie dados a um componente de software de destino específico, executado em outro sistema final. A API da Internet é um conjunto de regras que o software emissor deve cumprir para que a Internet seja capaz de enviar os dados ao componente de destino. Discutiremos a API da Internet mais detalhadamente no Capítulo 2. Agora, vamos traçar uma simples comparação, que será utilizada com frequência neste livro. Suponha que Alice queria enviar uma carta para Bob utilizando o serviço postal. Alice, é claro, não pode simplesmente escrever a carta (os dados) e atirá-la pela janela. Em vez disso, o serviço postal necessita que Alice coloque a carta em um envelope; escreva o nome completo de Bob, endereço e CEP no centro do envelope; feche; coloque um selo no canto superior direito do envelope; e, finalmente, coloque o envelope em uma caixa de correio oficial. Dessa maneira, o serviço postal possui sua própria “API de serviço postal”, ou conjunto de regras, que Alice deve cumprir para que sua carta seja entregue a Bob. De um modo semelhante, a Internet possui uma API que o software emissor de dados deve seguir para que a Internet envie os dados para o software receptor.

O serviço postal, naturalmente, fornece mais de um serviço a seus clientes: entrega expressa, confirmação de envio, carta simples e muito mais. Igualmente, a Internet prove diversos serviços a suas aplicações. Ao desenvolver uma aplicação para a Internet, você também deve escolher um dos serviços que a rede oferece. Uma descrição dos serviços da Internet será apresentada no Capítulo 2.

Esta segunda descrição da Internet — uma infraestrutura de fornecimento de serviços a aplicações distribuídas — é muito importante. Cada vez mais, os avanços na tecnologia dos componentes da Internet estão sendo guiados pelas necessidades de novas aplicações. Portanto, é importante ter sempre em mente que a Internet é uma infraestrutura na qual novas aplicações estão constantemente sendo inventadas e disponibilizadas.

Acabamos de apresentar duas descrições da Internet: uma delas diz respeito a seus componentes de hardware e software, e a outra, aos serviços que ela oferece a aplicações distribuídas. Mas talvez você ainda esteja confuso sobre o que é a Internet. O que é comutação de pacotes, TCP/IP e API? O que são roteadores? Que tipos de enlaces de comunicação estão presentes na Internet? O que é uma aplicação distribuída? Como uma torradeira ou um sensor de variações meteorológicas pode ser ligado à Internet? Se você está um pouco assustado com tudo isso agora, não se preocupe — a finalidade deste livro é lhe apresentar os mecanismos da Internet e também os princípios que determinam como e por que ela funciona. Explicaremos esses termos e questões importantes nas seções e nos capítulos subsequentes.

1.1.3 O que é um protocolo?

Agora que já entendemos um pouco o que é a Internet, vamos considerar uma outra palavra fundamental usada em redes de computadores: *protocolo*. O que é um protocolo? O que um protocolo faz?

Uma analogia humana

Provavelmente é mais fácil entender a ideia de um protocolo de rede de computadores considerando primeiramente algumas analogias humanas, já que executamos protocolos o tempo todo. Considere o que você faz quando quer perguntar as horas a alguém. Um diálogo comum é ilustrado na Figura 1.2.

O protocolo humano (ou as boas maneiras, ao menos) ordena que, ao iniciarmos uma comunicação com outra pessoa, primeiramente a cumprimos (o primeiro “oi” da Figura 1.2). A resposta comum para um “oi” é um outro “oi”. Implicitamente, tomamos a resposta cordial “oi” como uma indicação de que podemos prosseguir e perguntar as horas. Uma resposta diferente ao “oi” inicial (tal como “Não me perturbe!”, “I don’t speak Portuguese!” ou alguma resposta impública) poderia indicar falta de vontade ou incapacidade de comunicação. Nesse caso, o protocolo humano seria não perguntar que horas são. Às vezes, não recebemos nenhuma resposta para uma pergunta, caso em que normalmente desistimos de perguntar as horas à pessoa.

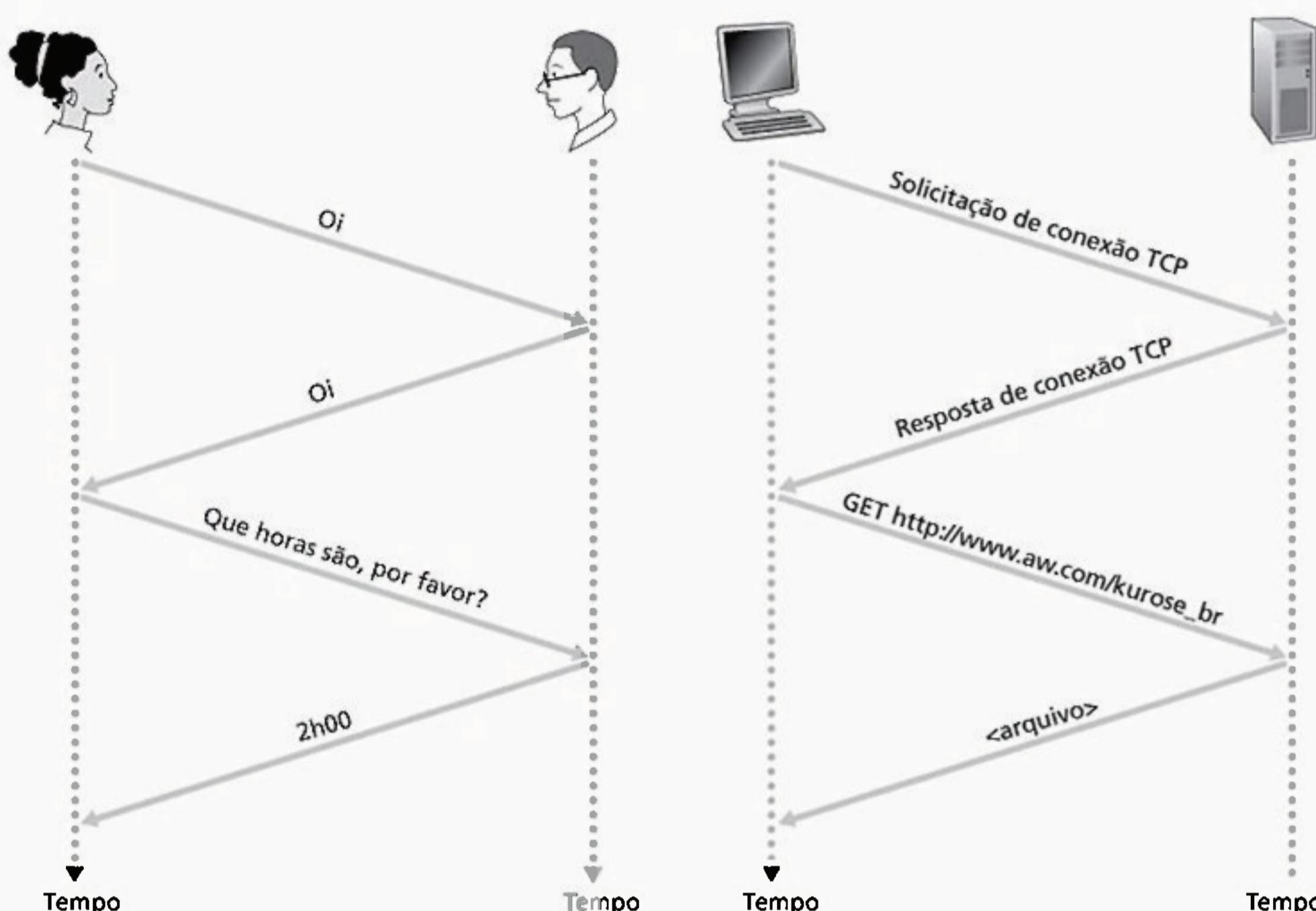


Figura 1.2 Um protocolo humano e um protocolo de rede de computadores

Note que, no nosso protocolo humano, *há mensagens específicas que enviamos e ações específicas que realizamos em reação às respostas recebidas ou a outros eventos (como nenhuma resposta após certo tempo)*. É claro que mensagens transmitidas e recebidas e ações realizadas quando essas mensagens são enviadas ou recebidas ou quando ocorrem outros eventos desempenham um papel central em um protocolo humano. Se as pessoas executarem protocolos diferentes (por exemplo, se uma pessoa tem boas maneiras, mas a outra não; se uma delas entende o conceito de horas, mas a outra não), os protocolos não interagem e nenhum trabalho útil pode ser realizado. O mesmo é válido para redes — é preciso que duas (ou mais) entidades comunicantes executem o mesmo protocolo para que uma tarefa seja realizada.

Vamos considerar uma segunda analogia humana. Suponha que você esteja assistindo a uma aula (sobre redes de computadores, por exemplo). O professor está falando monotonamente sobre protocolos e você está confuso. Ele para e pergunta: “Alguma dúvida?” (uma mensagem que é transmitida a todos os alunos e recebida por todos os que não estão dormindo). Você levanta a mão (transmitindo uma mensagem implícita ao professor). O professor percebe e, com um sorriso, diz “Sim...” (uma mensagem transmitida, incentivando-o a fazer sua pergunta — professores *adoram* perguntas) e você então faz sua pergunta (isto é, transmite sua mensagem ao professor). O professor ouve (recebe sua mensagem) e responde (transmite uma resposta a você). Mais uma vez, percebemos que a transmissão e a recepção de mensagens e um conjunto de ações convencionais, realizadas quando as mensagens são enviadas e recebidas, são o coração desse protocolo de pergunta e resposta.

Protocolos de rede

Um protocolo de rede é semelhante a um protocolo humano; a única diferença é que as entidades que trocam mensagens e realizam ações são componentes de hardware ou software de algum equipamento (por exemplo, computador, PDA, telefones celulares, roteador ou outro equipamento habilitado para rede). Todas as atividades na Internet que envolvem duas ou mais entidades remotas comunicantes são governadas por um protocolo. Por exemplo, protocolos implementados em hardware nas placas de interface de rede de dois computadores conectados fisicamente controlam o fluxo de bits no ‘cabô’ entre as duas placas de interface de rede; protocolos

de controle de congestionamento em sistemas finais controlam a taxa com que os pacotes são transmitidos entre a origem e o destino; protocolos em roteadores determinam o caminho de um pacote da origem ao destino. Protocolos estão em execução por toda a Internet e, consequentemente, grande parte deste livro trata de protocolos de rede de computadores.

Como exemplo de um protocolo de rede de computadores com o qual você provavelmente está familiarizado, considere o que acontece quando fazemos uma requisição a um servidor Web, isto é, quando digitamos o URL de uma página Web no browser. Isso é mostrado no lado direito da Figura 1.2. Primeiramente, o computador enviará uma mensagem de requisição de conexão ao servidor Web e aguardará uma resposta. O servidor receberá essa mensagem de requisição de conexão e retornará uma mensagem de resposta de conexão. Sabendo que agora está tudo certo para requisitar o documento da Web, o computador envia então o nome da página Web que quer buscar naquele servidor com uma mensagem GET. Por fim, o servidor retorna a página da Web (arquivo) para o computador.

Dados o exemplo humano e o exemplo de rede anteriores, as trocas de mensagens e as ações realizadas quando essas mensagens são enviadas e recebidas são os elementos fundamentais para a definição de um protocolo:

Um protocolo define o formato e a ordem das mensagens trocadas entre duas ou mais entidades comunicantes, bem como as ações realizadas na transmissão e/ou no recebimento de uma mensagem ou outro evento.

A Internet e as redes de computadores em geral fazem uso intenso de protocolos. Diferentes tipos de protocolos são usados para realizar diferentes tarefas de comunicação. À medida que for avançando na leitura deste livro, você perceberá que alguns protocolos são simples e diretos, enquanto outros são complexos e intelectualmente profundos. Dominar a área de redes de computadores equivale a entender o que são, por que existem e como funcionam os protocolos de rede.

1.2 A periferia da Internet

Nas seções anteriores, apresentamos uma descrição da Internet e de protocolos de rede fazendo analogias com nossos atos. Agora passaremos a tratar com um pouco mais de profundidade os componentes de uma rede de computadores (e da Internet, em particular). Nesta seção, começamos pela periferia de uma rede e examinamos os componentes com os quais estamos mais familiarizados — a saber, computadores, PDAs, telefones celulares e outros equipamentos que usamos diariamente. Na seção seguinte, passaremos da periferia para o núcleo da rede e estudaremos comutação e roteamento em redes de computadores.

Como descrito na seção anterior, no jargão de rede de computadores, os computadores e outros dispositivos conectados à Internet são frequentemente chamados de sistemas finais. Eles são assim chamados porque se encontram na periferia da Internet, como mostrado na Figura 1.3. Os sistemas finais da Internet incluem computadores de mesa (por exemplo, PCs de mesa, MACs e Linux Boxes), servidores (por exemplo, Web e servidores de e-mails), e computadores móveis (por exemplo, computadores portáteis, PDAs e telefones com conexão sem fio à Internet). Além disso, um crescente número de aparelhos alternativos estão sendo utilizados com a Internet como sistemas finais (veja página seguinte).

Sistemas finais também são denominados *hospedeiros (hosts)* porque hospedam (isto é, executam) programas de aplicação, tais como um programa browser da Web, um programa servidor da Web, um programa leitor de e-mail ou um servidor de e-mail. Neste livro, utilizaremos os termos hospedeiros e sistemas finais como sinônimos. Às vezes, sistemas finais são ainda subdivididos em duas categorias: clientes e servidores. Informalmente, clientes costumam ser PCs de mesa ou móveis, PDAs e assim por diante, ao passo que servidores tendem a ser máquinas mais poderosas que armazenam e distribuem páginas Web, vídeo em tempo real, retransmissão de e-mails e assim por diante.

1.2.1 Programas clientes e servidores

No contexto de software de rede há ainda uma outra definição de cliente e de servidor, à qual nos referiremos em todo o livro. Um programa cliente é um programa que funciona em um sistema final, que solicita e recebe um

História

Um conjunto impressionante de sistemas finais da Internet

Não faz muito tempo, os sistemas finais conectados à Internet eram primordialmente computadores tradicionais, como máquinas de mesa e servidores de grande capacidade. Desde o final da década de 1990 até hoje, um amplo leque de equipamentos e dispositivos interessantes, cada vez mais diversos, vem sendo conectado à Internet. A característica comum desses equipamentos é que eles precisam enviar e receber dados digitais de, e para, outros equipamentos. Tendo em vista a onipresença da Internet, seus protocolos bem definidos (padronizados) e a disponibilidade comercial de hardware capacitado para ela, é natural usar sua tecnologia para interconectar esses equipamentos.

Alguns deles parecem ter sido criados exclusivamente para diversão. Um computador de mesa utilizando IP com recurso de moldura de foto [Ceiva, 2009] solicita fotos digitais de um servidor remoto e as apresenta em um dispositivo que parece uma moldura tradicional de fotografia; uma torradeira da Internet baixa informações meteorológicas de um servidor e grava uma imagem da previsão do tempo do dia em questão (por exemplo, nublado, com sol) na sua torrada matinal [BBC, 2001]. Outros dispositivos fornecem informações úteis — câmeras Web apresentam as condições meteorológicas e de tráfego ou fazem monitoramento para fornecer uma localização de interesse; eletrodomésticos conectados à Internet (incluindo máquinas de lavar roupas, geladeiras e fogões) podem ser monitorados e controlados remotamente por meio de um browser. Telefones celulares que utilizam IP com recursos de GPS (como o novo iPhone da Apple) permitem fácil navegação pela Web e transmissão de e-mails e mensagens. Uma nova classe de sistemas de sensoriamento em rede promete revolucionar o modo como observamos e interagimos com nosso ambiente. Redes de sensores incorporadas ao ambiente físico permitem a monitoração de edifícios, pontes, atividade sísmica, habitats da fauna selvagem, estuários e das camadas inferiores da atmosfera [CENS, 2009, CASA, 2009]. Aparelhos biomédicos podem ser incorporados e conectados em rede, causando numerosos problemas de privacidade e segurança [Halperin, 2008]. Uma tag de RFID ou um sensor integrado ligado a qualquer objeto pode fornecer informações a respeito desse objeto na Internet, levando a uma “Internet de coisas” [ITU, 2005].

serviço de um programa servidor, que funciona em um outro sistema final. A Web, o e-mail, a transferência de arquivo, o login remoto, os grupos de discussão e muitas outras aplicações populares adotam o modelo cliente-servidor. Uma vez que um programa cliente normalmente roda em um computador e o programa servidor, em outro, aplicações cliente-servidor de Internet são, por definição, aplicações distribuídas. O programa cliente e o programa servidor interagem enviando mensagens um para o outro pela Internet. Nesse nível de abstração, os roteadores, enlaces e outros componentes da Internet funcionam como uma caixa-preta que transfere mensagens entre os componentes distribuídos, comunicantes, de um aplicação da Internet. Esse é o nível de abstração representado na Figura 1.3.

Nem todas as aplicações da Internet de hoje consistem em programas puramente clientes que interagem com programas puramente servidores. Muitas aplicações são, cada vez mais, peer-to-peer (P2P), nas quais os sistemas finais interagem e executam programas que apresentam funções de servidor e de cliente. Por exemplo, em aplicações P2P de compartilhamento de arquivos (como o BitTorrent e o eMule), o programa no sistema final do usuário funciona como um cliente quando solicita um arquivo de outro par; e o programa funciona como um servidor quando envia um arquivo para outro par. Na telefonia por Internet, as duas partes comunicantes interagem como pares; uma parte não requisita serviço da outra em nenhum sentido. Examinaremos detalhadamente as semelhanças e diferenças entre arquiteturas cliente-servidor e P2P no Capítulo 2.

1.2.2 Redes de acesso

Tendo considerado as aplicações e sistemas finais na “periferia da Internet”, vamos agora considerar as redes de acesso — os enlaces físicos que conectam um sistema final ao primeiro roteador (também conhecido como “roteador

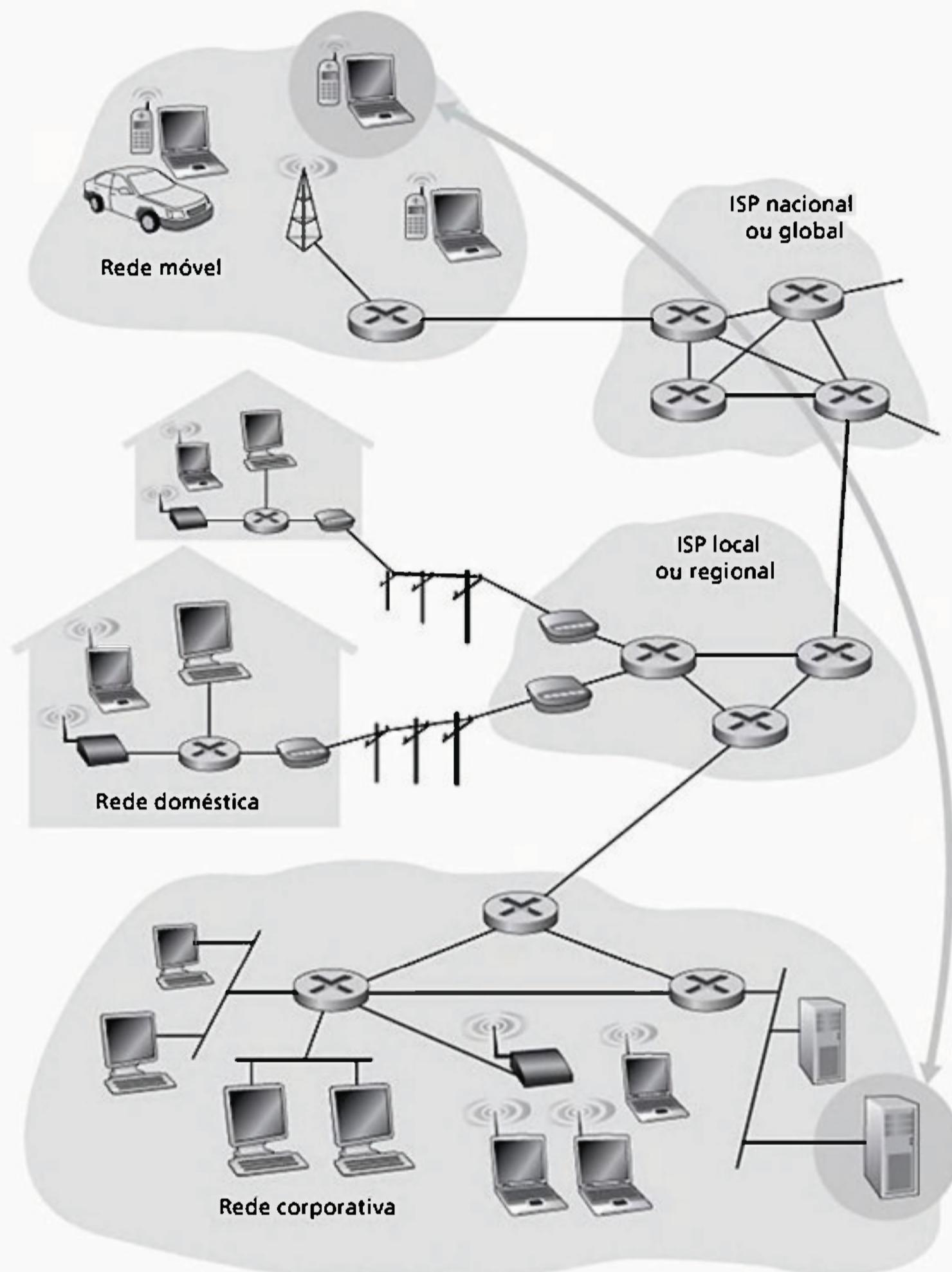


Figura 1.3 Intereração entre sistemas finais

de borda") partindo de um sistema final até outro qualquer. A Figura 1.4 apresenta diversos tipos de enlaces de acesso do sistema final ao roteador de periferia; os enlaces de acesso estão destacados nas linhas cinzas mais espessas. Esta seção analisa muitas das tecnologias mais comuns em rede de acesso, em termos gerais, de baixa à alta velocidade.

Veremos mais adiante que muitas dessas tecnologias empregam, em níveis que variam, parcelas da tradicional infraestrutura telefônica com fio. Essa infraestrutura é fornecida por um servidor telefônico local, que simplesmente chamaremos de operadora. São exemplos de operadoras a Verizon, nos Estados Unidos, e a France Telecom, na França. Cada residência (casa e apartamento) possui um par direto de fios de cobre trançado para um comutador da operadora na região, localizado em um edifício chamado “central telefônica” (CT) no jargão da telefonia. (Discutiremos par de fios de cobre trançado mais adiante nesta seção.) Uma operadora local possuirá, normalmente, centenas de CTs e ligará cada cliente à sua CT mais próxima.

Dial-up (discado)

Nos anos 1990, quase todos os usuários residenciais acessavam a Internet por meio de linhas telefônicas analógicas utilizando um modem discado. Atualmente, muitos usuários de países não desenvolvidos e de áreas rurais em países desenvolvidos (onde o acesso à banda larga é indisponível) ainda têm acesso à Internet discada. Na verdade, estima-se que 10% dos usuários residenciais nos Estados Unidos usavam Internet discada em 2008 [Pew, 2008].

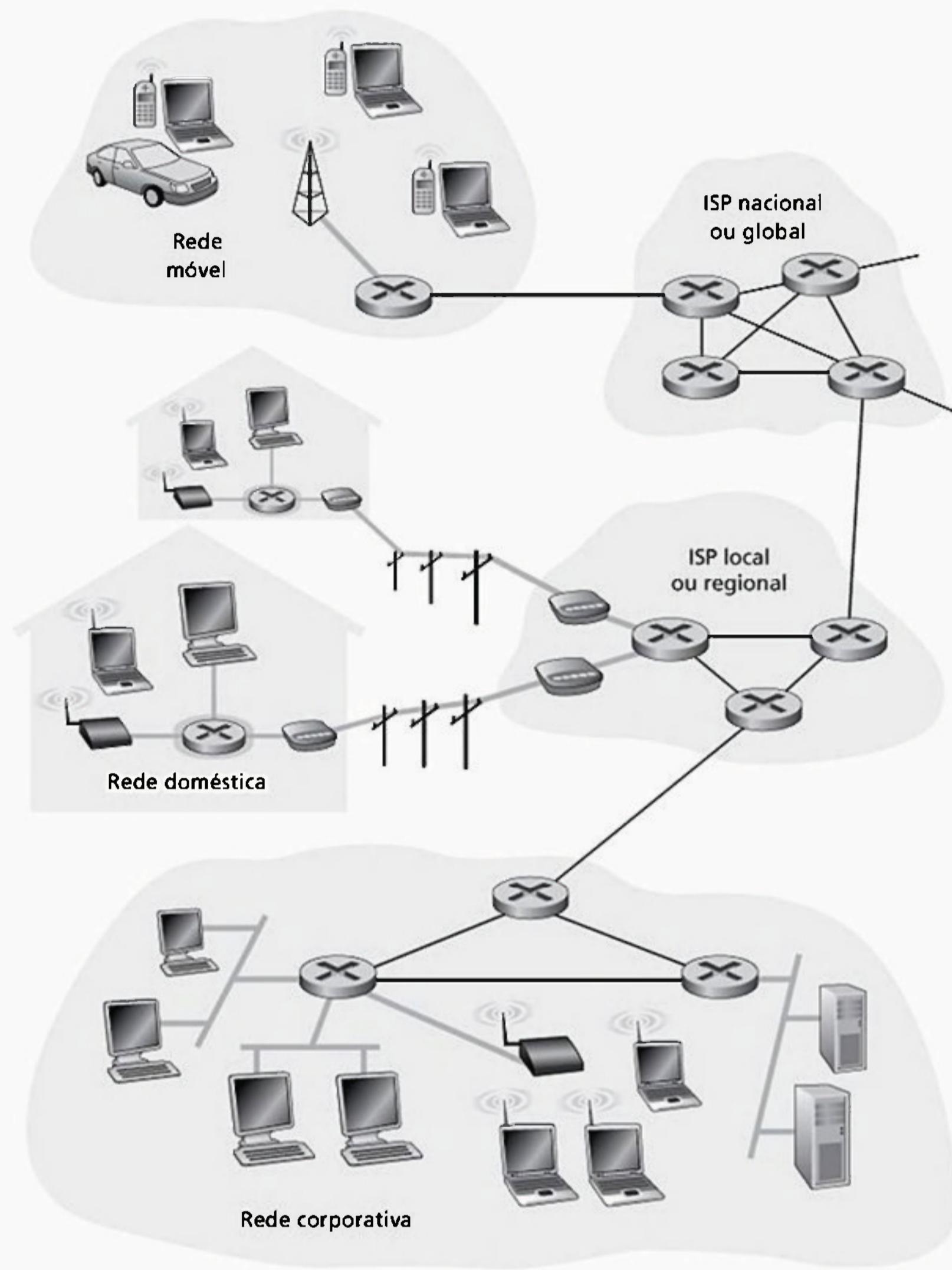


Figura 1.4 Acesso a redes

Emprega-se o termo “dial-up” porque o software do usuário, na verdade, disca (em inglês, *dial*) um número de telefone do ISP e realiza uma ligação telefônica tradicional com o ISP (por exemplo, com a AOL). Como mostrado na Figura 1.5, o computador é ligado a um modem discado, que, por sua vez, é conectado à linha telefônica analógica da residência. Essa linha telefônica é composta por cabos de cobre trançados e é a mesma linha telefônica utilizada para fazer ligações comuns. O modem da residência converte a saída digital do computador em um formato analógico apropriado para transmissão pela linha telefônica analógica. Na outra extremidade da conexão, um modem do ISP converte o sinal analógico em forma digital para inserir dados no roteador do ISP.

O acesso discado à Internet possui duas desvantagens principais. Em primeiro lugar, é extremamente lento, fornecendo uma taxa máxima de 56 kbps. A essa taxa, o download de uma música em formato MP3 de três minutos leva, aproximadamente, oito minutos, e um dia é o tempo que leva o download de um filme de 1 Gigabyte! Em segundo lugar, o acesso discado bloqueia a linha telefônica comum do usuário — enquanto uma pessoa usa o modem para navegar na Web, ninguém mais pode receber ou realizar ligações comuns com a mesma linha.

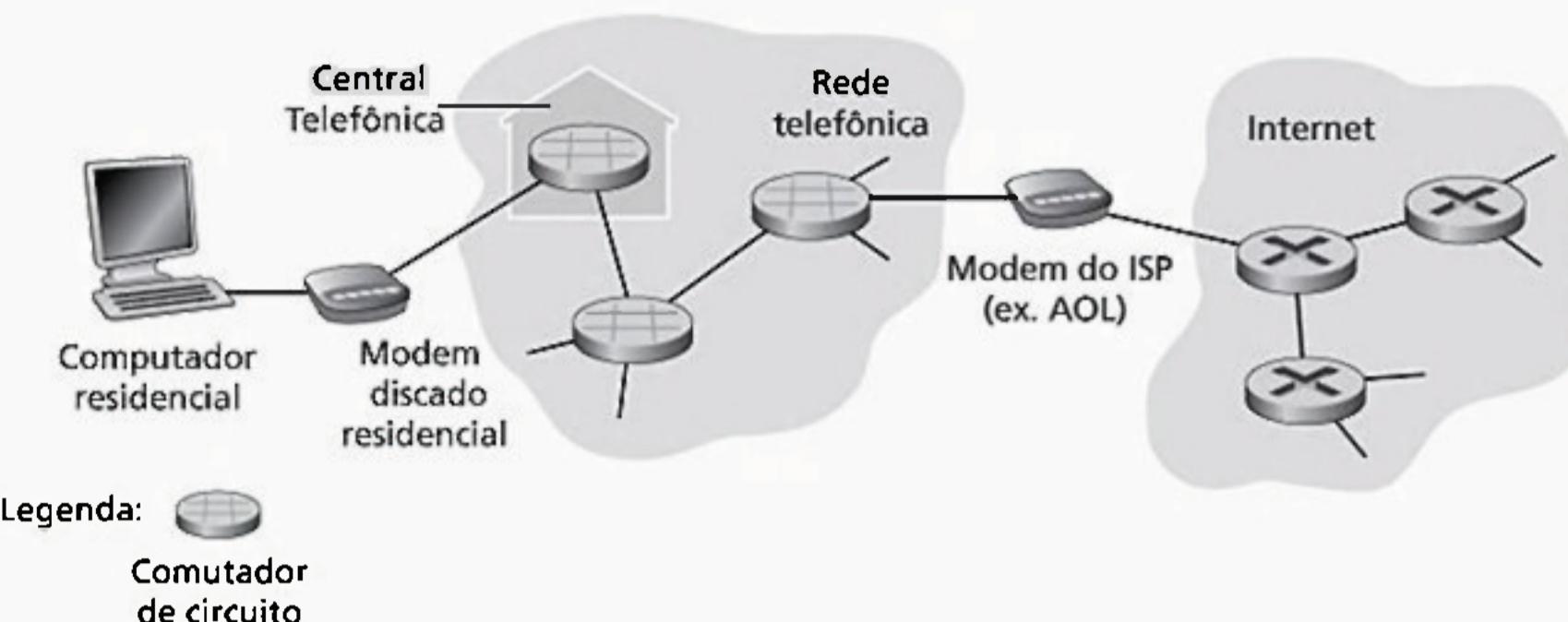


Figura 1.5 Acesso à Internet discada

DSL

Atualmente, os dois tipos de acesso residencial banda larga mais predominantes são a linha digital de assinante (DSL) ou a cabo. Em muitos países desenvolvidos hoje, mais de 50% das residências possuem acesso banda larga, sendo que a Coreia do Sul, Islândia, Holanda, Dinamarca e Suíça lideram o terreno com mais de 74% de penetração nas residências em 2008 [ITIF, 2008]. Nos Estados Unidos, a tecnologia DSL e a cabo têm a mesma participação no mercado para acesso banda larga [Pew, 2008]. Fora dos Estados Unidos e do Canadá, a DSL domina particularmente na Europa, onde em muitos países mais de 90% das conexões banda larga são DSL.

Normalmente uma residência obtém acesso DSL à Internet da mesma empresa que fornece acesso telefônico local com fio (por exemplo, a operadora local). Assim, quando a DSL é utilizada, uma operadora do cliente é também seu provedor de serviços de Internet (ISP). Como mostrado na Figura 1.6, cada modem DSL do cliente utiliza a linha telefônica existente (par de fios de cobre trançado) para trocar dados com um multiplexador digital de acesso à linha do assinante (DSLAM), normalmente localizado na CT da operadora. A linha telefônica conduz, simultaneamente, dados e sinais telefônicos, que são codificados em diferentes frequências:

- um canal downstream* de alta velocidade, com uma banda de 50 kHz a 1 MHz;
- um canal upstream* de velocidade média, com uma banda de 4 kHz a 50 kHz;
- um canal de telefone bidirecional comum, com uma banda de 0 a 4 kHz.

Essa abordagem faz com que a conexão DSL pareça três conexões distintas, de modo que um telefone e a conexão com a Internet podem compartilhar a conexão DSL ao mesmo tempo. (Descreveremos essa técnica de multiplexação por divisão de frequência na Seção 1.3.1.) Do lado do consumidor, para os sinais que chegam até sua casa, um distribuidor separa os dados e os sinais telefônicos e conduz o sinal com os dados para o modem DSL. Na operadora, na CT, o DSLAM separa os dados e os sinais telefônicos e envia aqueles para a Internet. Centenas ou mesmo milhares de residências se conectam a um único DSLAM [Cha, 2009; Dischinger, 2007].

A tecnologia DSL possui duas principais vantagens sobre o acesso discado. Primeiro, ela pode transmitir e receber dados a taxas muito mais elevadas. Normalmente, um cliente DSL terá uma taxa de transmissão na faixa de 1 a 2 Mbps (da CT para a residência) e a taxa de recebimento de 128 kbps a 1 Mbps. Em razão de as taxas de transmissão e recebimento serem diferentes, o acesso é conhecido como assimétrico. A segunda vantagem principal é que os usuários podem, simultaneamente, falar ao telefone e acessar à Internet. Diferentemente do acesso dial-up, os usuários não discam um número de telefone do ISP para acessar à rede; pelo contrário, eles têm uma conexão permanente ao DSLAM do provedor (e, portanto, à Internet).

* N.R.T.: Os termos “downstream” e “upstream” descrevem a transmissão de dados *para* o cliente e *do* cliente, respectivamente.

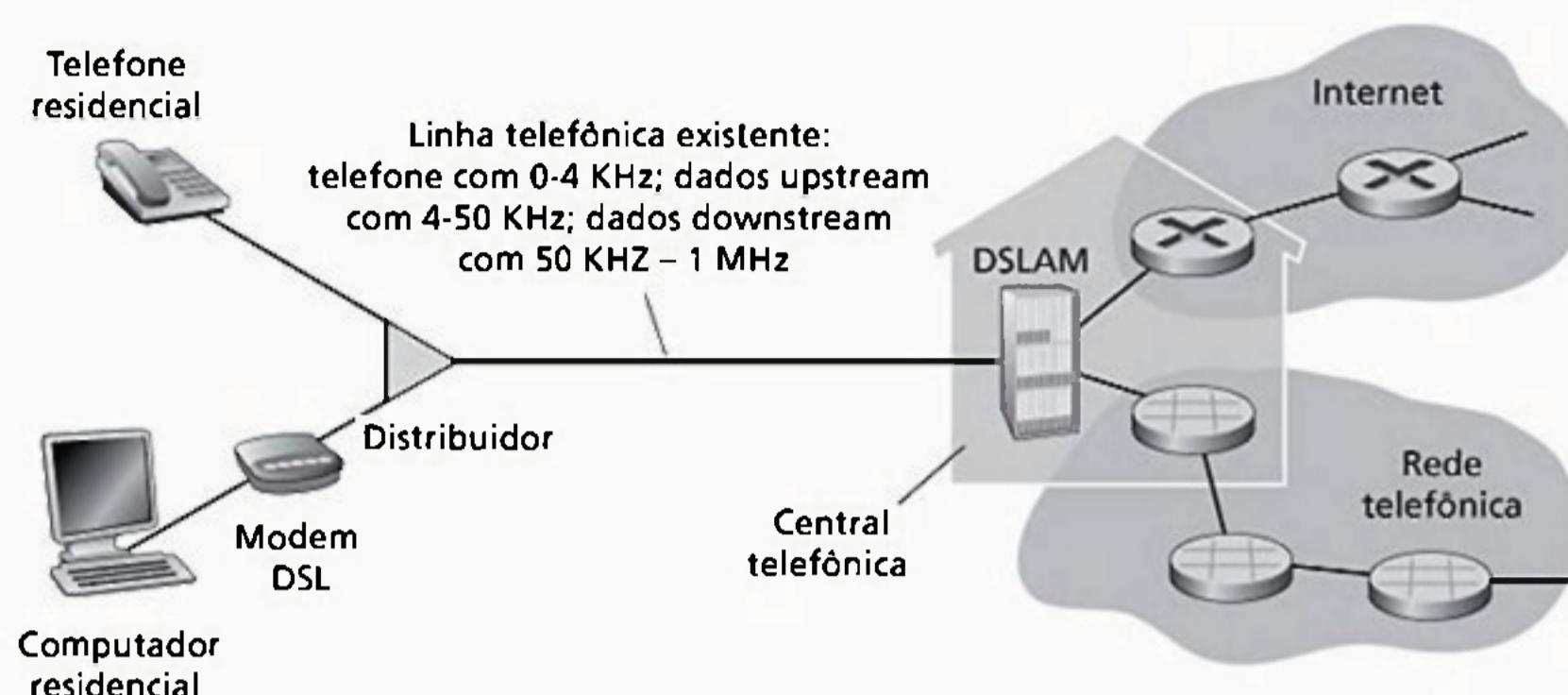


Figura 1.6 Acesso à Internet DSL

A taxa de transmissão de downstream e upstream real disponível para as residências é uma função da distância entre a casa e a CT, permitindo taxas de transmissão mais elevadas do que no acesso discado. Para aumentar a taxa de dados, a DSL conta com um processamento de sinal avançado e algoritmos de correção de erro, que podem levar a grandes atrasos de pacotes. No entanto, se a residência não estiver localizada dentro de 8 a 15 quilômetros da CT, a tecnologia de processamento de sinal DSL não será mais eficaz e a residência deve recorrer a uma forma alternativa de acesso à Internet.

Há também uma variedade de tecnologias DSL de alta velocidade em alguns países atualmente. Por exemplo, a tecnologia DSL de alta velocidade (VDSL), com a maior penetração, hoje, na Coreia e no Japão, apresenta taxas impressionantes de 12 a 55 Mbps para downstream e 1.6 a 20 Mbps para upstream [DSL, 2009].

Cabo

Muitas residências na América do Norte e em outros lugares recebem centenas de canais de televisão por redes de cabo coaxial. (Discutiremos cabo coaxial mais adiante nesta seção.) Em um sistema tradicional de televisão a cabo, um terminal de distribuição transmite canais de televisão através de uma rede de distribuição de cabo coaxial e amplificadores para as residências.

Enquanto as tecnologias DSL e dial-up utilizam-se da infraestrutura telefônica local existente da operadora, o acesso à Internet a cabo utiliza-se da infraestrutura de televisão a cabo existente da empresa de TV a cabo. Uma residência obtém acesso à Internet a cabo da mesma empresa que fornece a televisão a cabo. Como ilustrado na Figura 1.7, as fibras ópticas conectam o terminal de distribuição às junções da região, sendo o cabo coaxial tradicional utilizado para chegar às casas e apartamentos individualmente. Cada junção normalmente suporta de 500 a 5.000 casas. Em razão de a fibra e o cabo coaxial fazerem parte desse sistema, a rede é denominada híbrida fibra-coaxial (HFC).

O acesso à Internet a cabo necessita de modems especiais, denominados modems a cabo. Como o modem DSL, o modem a cabo é, normalmente, um aparelho externo que se conecta ao computador residencial através da porta Ethernet. (Discutiremos Ethernet em detalhes no Capítulo 5.) Os modems a cabo dividem a rede HFC em dois canais, um de transmissão (downstream) e um de recebimento (upstream). Como a tecnologia DSL, o acesso normalmente é assimétrico, com o canal downstream recebendo uma taxa de transmissão maior do que a do canal upstream.

Uma característica importante do acesso a cabo é o fato de ser um meio de transmissão compartilhado. Em especial, cada pacote enviado pelo terminal viaja pelos enlaces downstream até cada residência e cada pacote enviado por uma residência percorre o canal upstream até o terminal de transmissão. Por essa razão, se diversos usuários estiverem fazendo o download de um arquivo em vídeo simultaneamente no canal downstream, cada usuário receberá o arquivo a uma taxa significativamente menor do que a taxa de transmissão a cabo. Por outro lado, se há somente alguns usuários ativos que estão navegando na Web, então cada um poderá receber páginas da Web a uma taxa de downstream máxima, pois esses usuários raramente solicitarão uma página da Web ao mesmo tempo. Como o canal upstream também é compartilhado, é necessário um protocolo de acesso múltiplo distribuído para coordenar as transmissões e evitar colisões. (Discutiremos a questão de colisão no Capítulo 5.)

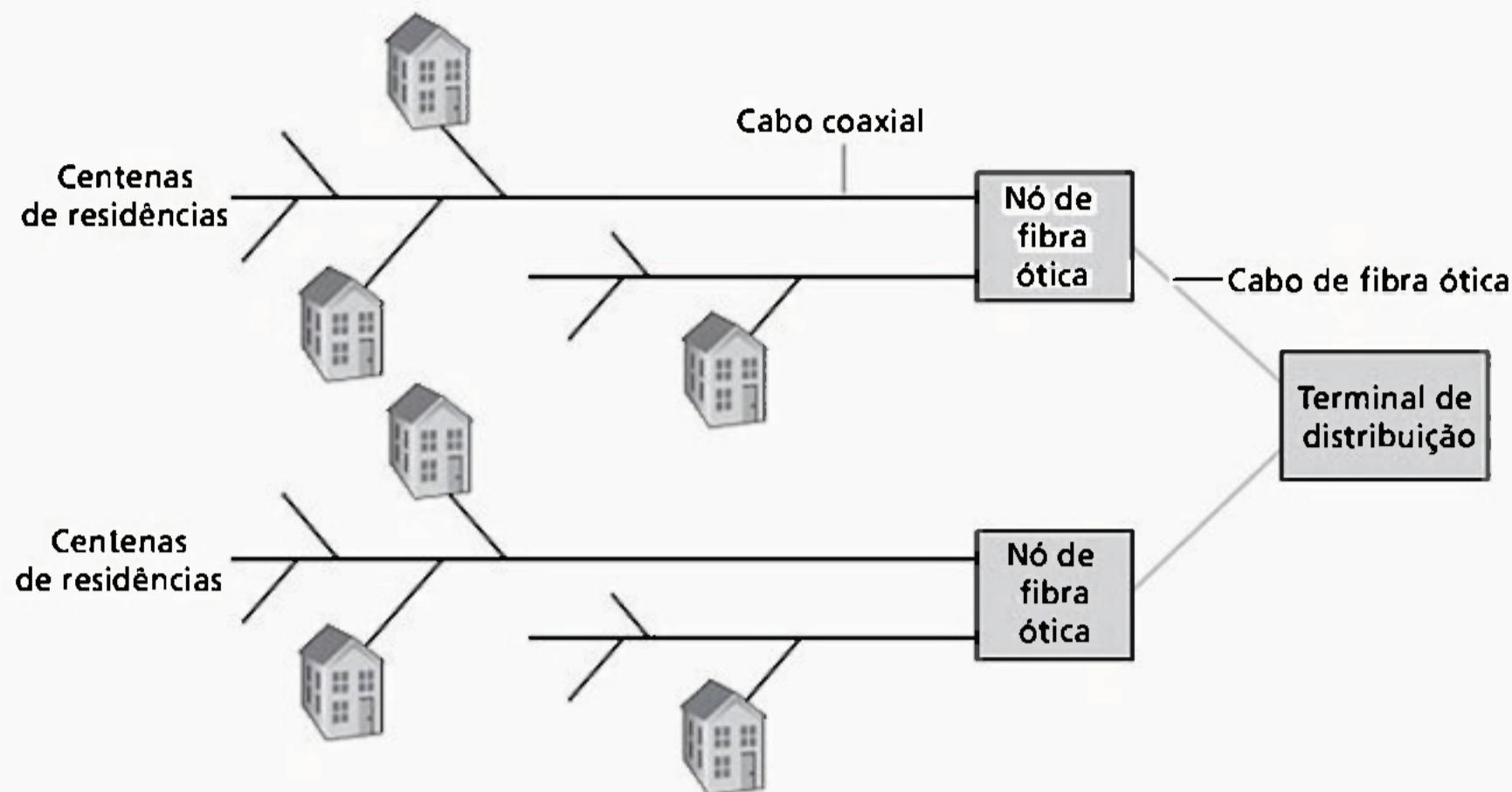


Figura 1.7 Uma rede de acesso híbrida fibra-coaxial

Os defensores da tecnologia DSL se apressam em frisar que ela é uma conexão ponto a ponto entre a residência e o ISP e que, portanto, a capacidade de transmissão total da conexão DSL entre a residência e o ISP é dedicada, e não compartilhada. Os defensores do cabo, no entanto, argumentam que uma rede HFC razoavelmente dimensionada provê taxas de transmissão mais altas do que a DSL. Não há dúvidas de que a guerra entre DSL e HFC pelo acesso residencial de alta velocidade já começou, principalmente na América do Norte. Nas áreas rurais, onde nem a DSL e a HFC estão disponíveis, pode ser utilizada uma conexão por satélite para conectar uma residência à Internet em velocidades superiores a 1Mbps; o StarBand e o HughesNet são dois provedores de acesso via satélite.

FTTH (Fiber-To-The-Home)

A fibra ótica (que será discutida na Seção 1.2.3) pode oferecer taxas de transmissão significativamente mais altas do que o par de fios de cobre trançado ou o cabo coaxial. Algumas operadoras locais (em muitos países diferentes), que recentemente passaram a utilizar fibra ótica nas residências, agora oferecem acesso à Internet de alta velocidade, bem como serviços telefônicos e televisivos através de fibras ópticas. Nos Estados Unidos, a Verizon saiu na frente com a tecnologia FTTH, lançando o serviço FIOS [Verizon FIOS, 2009].

Existem várias tecnologias concorrentes para a distribuição ótica das CTs às residências. A rede mais simples de distribuição ótica é chamada fibra direta, para a qual existe uma fibra saindo da CT para cada residência. Essa distribuição pode fornecer uma alta largura de banda, uma vez que cada cliente recebe sua própria fibra dedicada diretamente da central telefônica. Geralmente, cada fibra que sai da central telefônica é compartilhada por várias residências; a fibra é dividida em fibras individuais do cliente somente após ela se aproximar relativamente das residências. Existem duas arquiteturas concorrentes de rede de distribuição ótica que apresentam essa divisão: redes ópticas ativas (AONs) e redes ópticas passivas (PONs). A AON é basicamente a Ethernet comutada, assunto discutido no Capítulo 5. Aqui, falaremos brevemente sobre a PON, que é utilizada no serviço FIOS da Verizon. A Figura 1.8 mostra a FTTH utilizando a arquitetura de distribuição de PON. Cada residência possui um terminal de rede ótica (ONT), que é conectado por uma fibra ótica dedicada a um distribuidor da região. O distribuidor combina um número de residências (normalmente menos de 100) a uma única fibra ótica compartilhada, que se liga a um terminal de linha ótica (OLT) na CT da operadora. O OLT, que fornece conversão entre os sinais ópticos e elétricos, se conecta a Internet por meio de um roteador da operadora. Na residência, o usuário conecta um roteador residencial (geralmente um roteador sem fio) ao ONT e acessa à Internet através desse roteador. Na arquitetura de PON, todos os pacotes enviados do OLT ao distribuidor são nele replicados (semelhante ao terminal de distribuição a cabo).

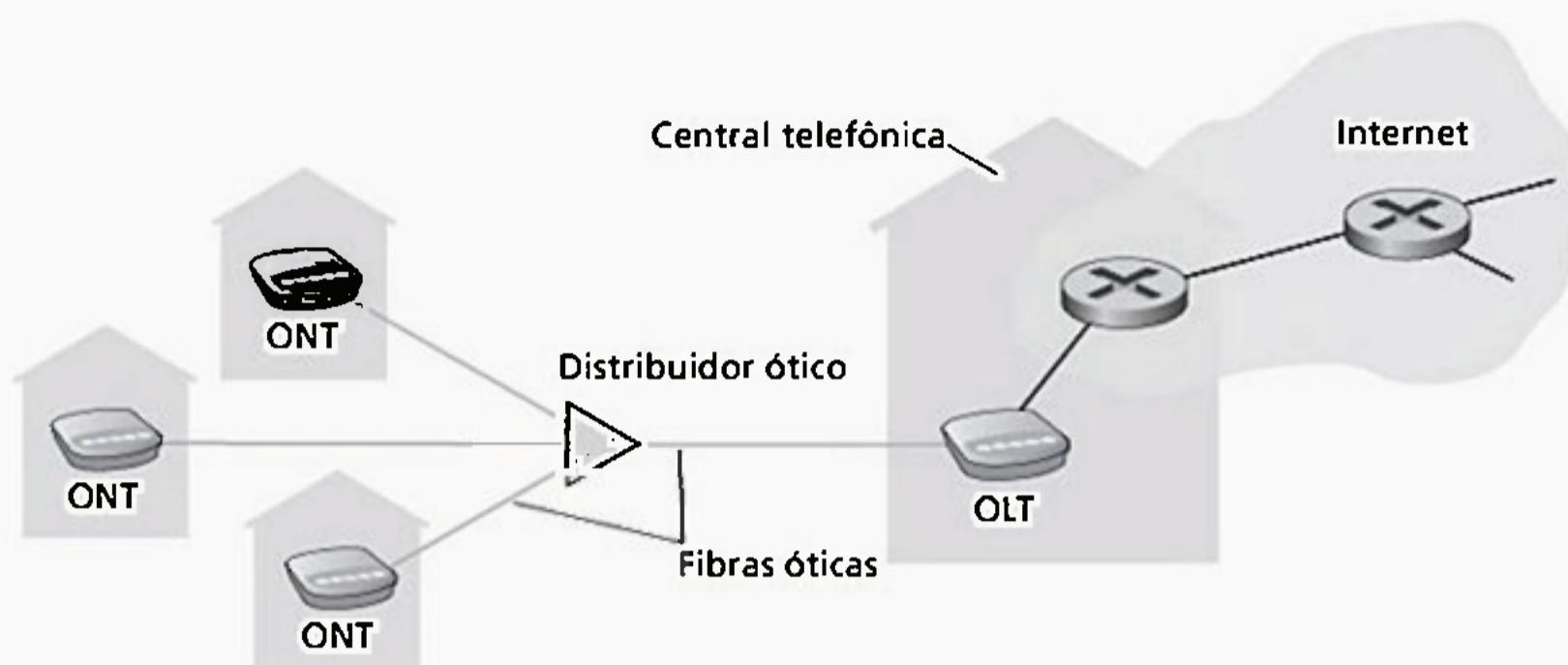


Figura 1.8 Acesso à Internet FTTH

A FTTH pode potencialmente prover taxas de acesso à Internet na faixa de gigabits por segundo. Porém, a maioria dos provedores de FTTH oferecem diferentes taxas, sendo que as mais altas custam muito mais. Atualmente, a maioria dos clientes FTTH preferem taxas de download na faixa de 10 a 20 Mbps e de upload na faixa de 2 a 10 Mbps. Além do acesso à Internet, as fibras ópticas possuem serviços telefônicos tradicionais e de transmissão televisiva.

Ethernet

Nos campi universitários e corporativos, uma rede local (LAN) geralmente é usada para conectar sistemas finais ao roteador da periferia. Embora existam muitos tipos de tecnologia LAN, a Ethernet é, de longe, a tecnologia de acesso mais predominante nas redes universitárias e corporativas. Como mostrado na Figura 1.9, os usuários da Ethernet utilizam par de fios de cobre trançado para se conectarem a um comutador Ethernet, uma tecnologia tratada com mais detalhes no Capítulo 5. O acesso à Ethernet normalmente possui 100 Mbps, enquanto os servidores possuem um acesso de 1 Gbps ou até mesmo 10 Gbps.

WiFi

Está cada vez mais comum as pessoas acessarem a Internet sem fio, seja por um laptop ou por um aparelho portátil, como um iPhone, Blackberry ou o Google phone (veja o quadro "Um conjunto impressionante de sistemas finais da Internet"). Hoje, há dois tipos comuns de acesso à Internet sem fio. Em uma LAN sem fio, os usuários transmitem/recebem pacotes para/de um ponto de acesso que, por sua vez, é conectado à Internet com

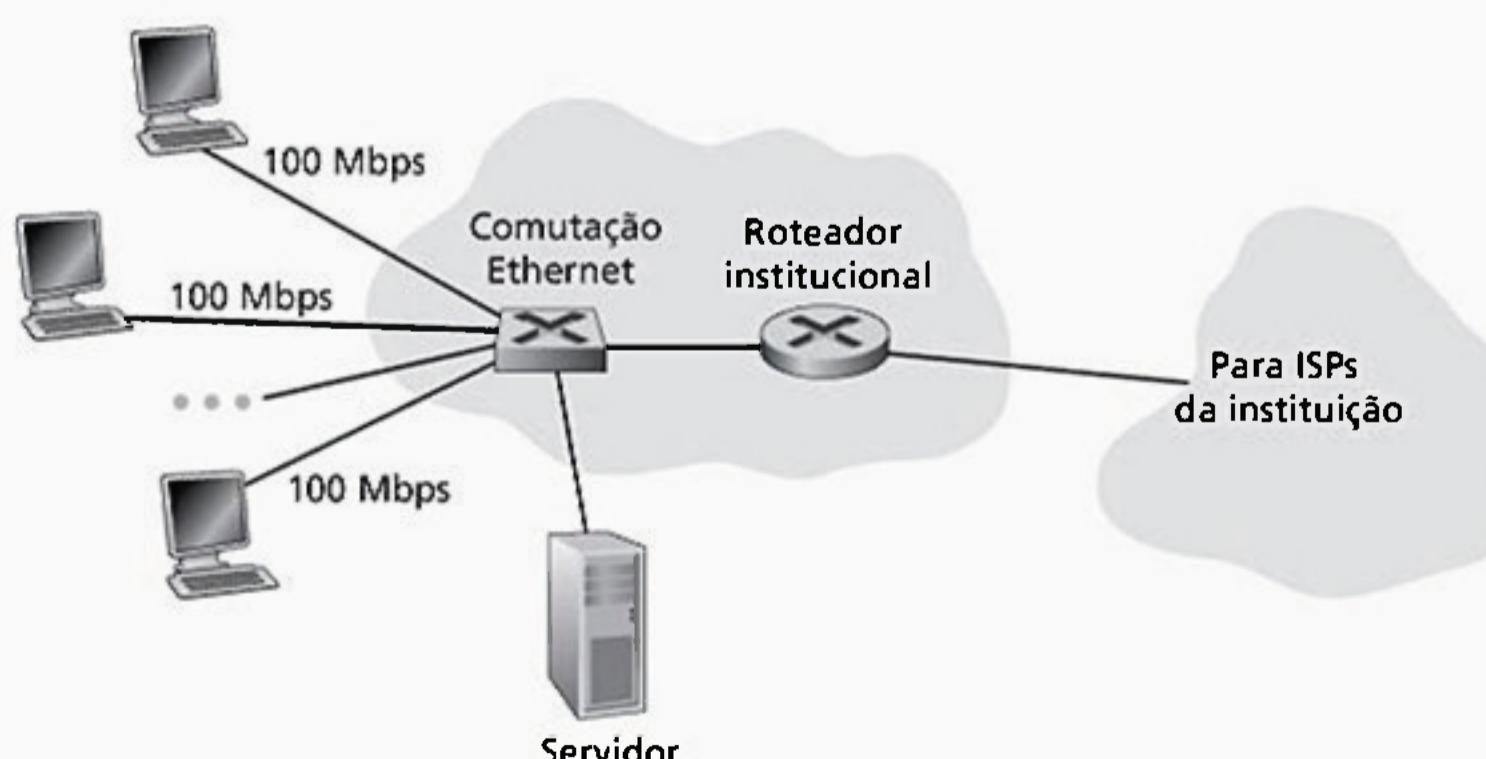


Figura 1.9 Acesso à rede Ethernet

fio. Um usuário LAN sem fio geralmente deve estar no espaço de alguns metros do ponto de acesso. Nas redes de acesso sem fio em amplas áreas, os pacotes são transmitidos para uma estação-base por meio da mesma infraestrutura sem fio utilizada para telefonia celular. Nesse caso, a estação-base é controlada pelo provedor da rede de celular, e o usuário normalmente deve estar dentro de alguns quilômetros da estação-base.

O acesso à LAN sem fio baseado na tecnologia IEEE 802.11, ou seja, WiFi, está presente em todo lugar — universidades, empresas, cafés, aeroportos, residências e, até mesmo, em aviões. A maioria das universidades instalou estações-base por todo o campus, permitindo que os alunos enviem e recebam e-mails ou naveguem na Web de qualquer lugar do campus. Em muitas cidades, é possível ficar na esquina de uma rua e estar dentro da faixa de dez ou vinte estações-base (para um mapa global de estações-base 802.11 que foram descobertas e acessadas por pessoas que apreciam coisas do tipo, veja [wigle.net, 2009]). Como discutido com detalhes no Capítulo 6, atualmente o 802.11 fornece uma taxa de transmissão compartilhada de até 54 Mbps.

Muitas residências unem o acesso residencial banda larga (ou seja, modems a cabo ou DSL) com a tecnologia LAN sem fio a um custo acessível para criar redes residenciais potentes. A Figura 1.10 mostra um esquema de uma típica rede doméstica. Essa rede consiste em um laptop móvel e um computador com fio; uma estação-base (o ponto de acesso sem fio), que se comunica com o computador sem fio; um modem a cabo, fornecendo acesso banda larga à Internet; e um roteador, que interconecta a estação-base e o computador fixo com o modem a cabo. Essa rede permite que os moradores da residência tenham acesso banda larga à Internet com um morador se movimentando da cozinha ao quintal e até os quartos.

Acesso sem fio em longa distância

Ao acessar à Internet através da tecnologia LAN sem fio, é preciso estar dentro de alguns metros do ponto de acesso. Isso é possível para acesso doméstico, em cafés, e, geralmente, dentro e ao redor de um edifício. Mas e se você estiver na praia, no ônibus ou no carro e precisar da Internet? Para o acesso em áreas amplas, os usuários de Internet móvel utilizam uma infraestrutura de telefone celular, acessando estações-base que estão a até 10 quilômetros de distância.

As empresas de telecomunicação têm investido enormemente na assim chamada terceira geração (3G) sem fio, que oferece acesso sem fio em amplas áreas por pacotes comutados a velocidades que ultrapassam 1 Mbps. Hoje, milhões de usuários estão utilizando essas redes para ler e enviar e-mails, navegar na Web e fazer download de música.

WiMAX

Como sempre, existe uma tecnologia potente esperando para destronar esses padrões. O WiMAX [Intel WiMAX, 2009; WiMAX Forum, 2009], também conhecido como IEEE 802.16, é um primo distante do protocolo

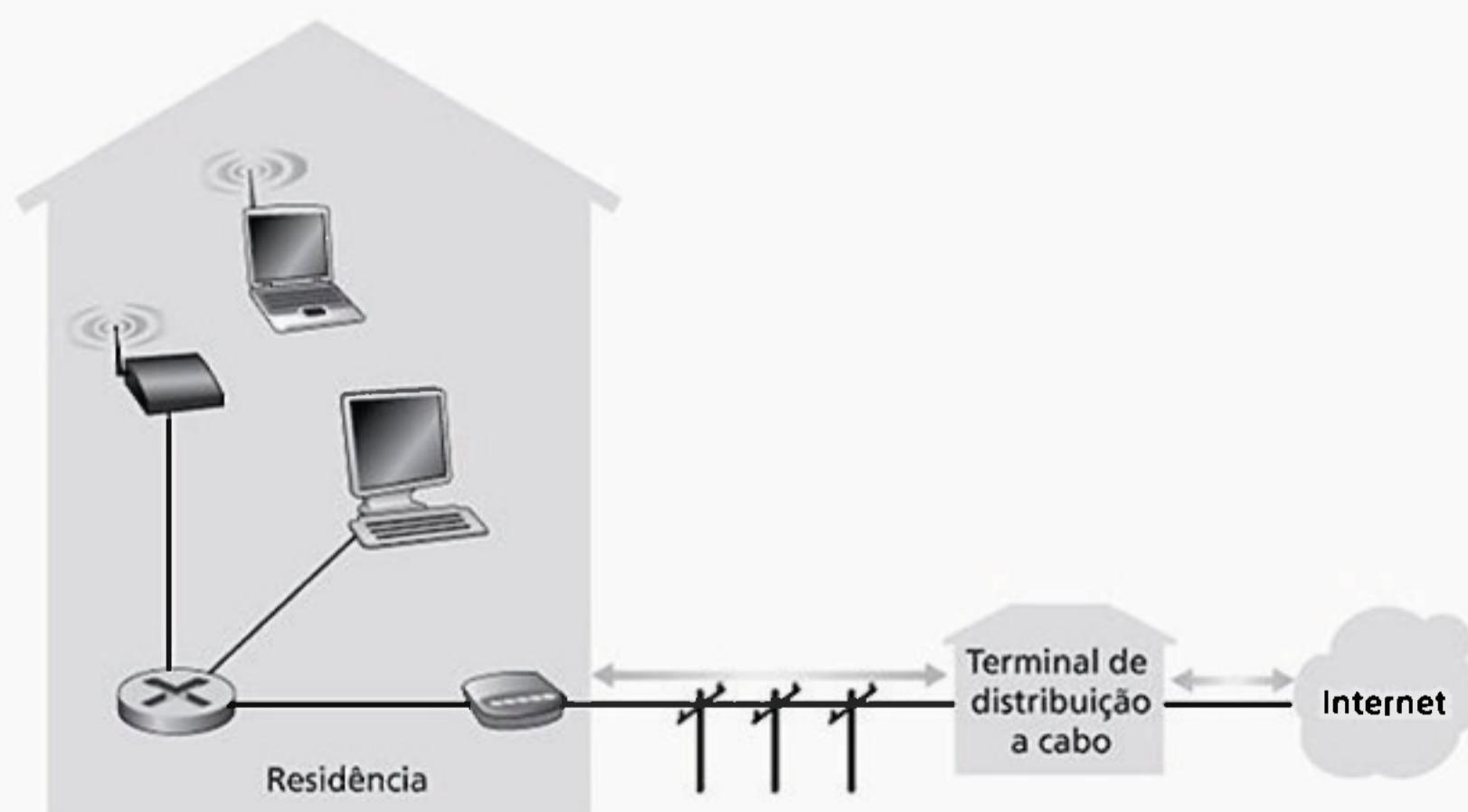


Figura 1.10 Esquema de uma típica rede doméstica

WiFi 802.11 discutido acima. O WiMAX funciona independentemente de uma rede de telefonia celular e promete velocidades de 5 a 10 Mbps ou maiores a distâncias superiores a dez quilômetros. A Sprint-Nextel investiu bilhões de dólares na implementação do WiMAX em 2007 e foi além. As tecnologias WiFi, WiMAX e 3G serão abrangidas em detalhes no Capítulo 6.

1.2.3 Meios físicos

Na subseção anterior, apresentamos uma visão geral de algumas das mais importantes tecnologias de acesso à Internet. Ao descrever essas tecnologias, indicamos também os meios físicos utilizados por elas. Por exemplo, dissemos que o HFC usa uma combinação de cabo de fibra ótica e cabo coaxial e que modems discados de 56 kbps e ADSL usam par de fios de cobre trançado. Dissemos também que redes de acesso móveis usam o espectro de rádio. Nesta subseção damos uma visão geral desses e de outros meios de transmissão comumente empregados na Internet.

Para definir o que significa meio físico, vamos pensar na curta vida de um bit. Considere um bit saindo de um sistema final, transitando por uma série de enlaces e roteadores e chegando a outro sistema final. Esse pobre bit é transmitido muitas e muitas vezes. Primeiramente, o sistema final originador transmite o bit e, logo em seguida, o primeiro roteador da série recebe-o; então, o primeiro roteador envia-o para o segundo roteador e assim por diante. Assim, nosso bit, ao viajar da origem ao destino, passa por uma série de pares transmissores-receptores, que o recebem por meio de ondas eletromagnéticas ou pulsos óticos que se propagam por um meio físico. Com muitos aspectos e formas possíveis, o meio físico não precisa ser obrigatoriamente do mesmo tipo para cada par transmissor-receptor ao longo do caminho. Alguns exemplos de meios físicos são: par de fios de cobre trançado, cabo coaxial, cabo de fibra ótica multimodo, espectro de rádio terrestre e espectro de rádio por satélite. Os meios físicos se enquadram em duas categorias: meios guiados e meios não guiados. Nos meios guiados, as ondas são dirigidas ao longo de um meio sólido, tal como um cabo de fibra ótica, um par de fios de cobre trançado ou um cabo coaxial. Nos meios não guiados, as ondas se propagam na atmosfera e no espaço, como é o caso de uma LAN sem fio ou de um canal digital de satélite.

Porém, antes de examinar as características dos vários tipos de meios, vamos discutir um pouco os seus custos. O custo real de um enlace físico (fio de cobre, cabo de fibra ótica e assim por diante) é em geral relativamente insignificante em comparação a outros custos da rede. Em especial, o custo da mão de obra de instalação do enlace físico pode ser várias vezes maior do que o do material. Por essa razão, muitos construtores instalam pares de fios trançados, fibra ótica e cabo coaxial em todas as salas de um edifício. Mesmo que apenas um dos meios seja usado inicialmente, há uma boa probabilidade de outro meio ser usado no futuro próximo — portanto, poupa-se dinheiro por não ser preciso instalar fiação adicional no futuro.

Par de fios de cobre trançado

O meio de transmissão guiado mais barato e mais comumente usado é o par de fios de cobre trançado, que vem sendo usado há mais de cem anos nas redes de telefonia. Realmente, mais de 99 por cento da fiação que conecta aparelhos telefônicos a centrais locais utilizam pares de fios de cobre trançados. Quase todos nós já vimos um par de fios trançado em casa ou no local de trabalho; esse par constituído de dois fios de cobre isolados, cada um com aproximadamente um milímetro de espessura, enrolados em espiral. Os fios são trançados para reduzir a interferência elétrica de pares semelhantes que estejam próximos. Normalmente, uma série de pares é conjugada dentro de um cabo, isolando-se os pares com blindagem de proteção. Um par de fios constitui um único enlace de comunicação. O par de fios trançado sem blindagem (*unshielded twisted pair* — UTP) é comumente usado em redes de computadores de edifícios, isto é, em LANs. Hoje, as taxas de transmissão de dados para as LANs de pares trançados estão na faixa de 10 Mbps a 1 Gbps. As taxas de transmissão de dados que podem ser alcançadas dependem da bitola do fio e da distância entre transmissor e receptor.

Quando a tecnologia da fibra ótica surgiu na década de 1980, muitos depreciaram o par trançado devido às suas taxas de transmissão de bits relativamente baixas. Alguns até acharam que a tecnologia da fibra ótica o substituiria completamente. Mas o par trançado não desistiu assim tão facilmente. A moderna tecnologia, tal como UTP

categoria 5, pode alcançar taxas de transmissão de dados de 100 Mbps para distâncias de até algumas centenas de metros. E, em distâncias mais curtas, podem ser atingidas taxas ainda maiores. No final, o par trançado firmou-se como a solução dominante para LANs de alta velocidade.

Como vimos na seção sobre redes de acesso, o par trançado também é comumente usado para acesso residencial à Internet. Vimos que a tecnologia do modem discado possibilita taxas de acesso de até 56 kbps com pares trançados. Vimos também que a tecnologia DSL (linha digital de assinante) habilitou usuários residenciais a acessar a Internet em velocidades maiores do que 6 Mbps com pares de fios trançados (quando as residências estão próximas a um modem de ISP).

Cabo coaxial

Como o par trançado, o cabo coaxial é constituído de dois condutores de cobre, porém concêntricos e não paralelos. Com essa configuração, isolamento e blindagem especiais, pode alcançar taxas altas de bits. Cabos coaxiais são muito comuns em sistemas de televisão a cabo. Como já comentamos, recentemente sistemas de televisão a cabo foram acoplados com modems a cabo para prover usuários residenciais de acesso à Internet a velocidades de 1 Mbps ou mais altas. Em televisão a cabo e acesso a cabo à Internet, o transmissor passa o sinal digital para uma banda de frequência específica e o sinal analógico resultante é enviado do transmissor para um ou mais receptores. O cabo coaxial pode ser utilizado como um meio compartilhado guiado. Especificamente, vários sistemas finais podem ser conectados diretamente ao cabo, e todos eles recebem qualquer sinal que seja enviado pelos outros sistemas finais.

Fibras óticas

A fibra ótica é um meio delgado e flexível que conduz pulsos de luz, sendo que cada um desses pulsos representa um bit. Uma única fibra ótica pode suportar taxas de transmissão elevadíssimas, de até dezenas ou mesmo centenas de gigabits por segundo. Fibras ópticas são imunes à interferência eletromagnética, têm baixíssima atenuação de sinal até cem quilômetros e são muito difíceis de derivar. Essas características fizeram da fibra ótica o meio preferido para a transmissão guiada de grande alcance, em especial para cabos submarinos. Hoje, muitas redes telefônicas de longa distância dos Estados Unidos e de outros países usam exclusivamente fibras ópticas, que também predominam no backbone da Internet. Contudo, o alto custo de equipamentos ópticos — como transmissores, receptores e comutadores — vem impedindo sua utilização para transporte a curta distância, como em LANs ou em redes de acesso residenciais. As velocidades de conexão do padrão Optical Carrier (OC) variam de 51,8 Mbps a 39,8 Gbps; essas especificações são frequentemente denominadas OC-n, em que a velocidade de conexão se iguala a $n \times 51,8$ Mbps. Os padrões usados atualmente incluem OC-1, OC-3, OC-12, OC-24, OC-48, OC-96, OC-192 e OC-768. [IEC Optical, 2009; Goralski, 2001; Ramaswami, 1998; Mukherjee, 1997] apresentam uma abordagem de vários aspectos da rede ótica.

Canais de rádio terrestres

Canais de rádio carregam sinais dentro do espectro eletromagnético. São um meio atraente porque sua instalação não requer cabos físicos, podem atravessar paredes, dão conectividade ao usuário móvel e, potencialmente, podem transmitir um sinal a longas distâncias. As características de um canal de rádio dependem significativamente do ambiente de propagação e da distância pela qual o sinal deve ser transmitido. Condições ambientais determinam perda de sinal no caminho e atenuação por efeito de sombra (que reduz a intensidade do sinal quando ele transita por distâncias longas e ao redor/através de objetos interferentes), atenuação por multivias (devido à reflexão do sinal quando atinge objetos interferentes) e interferência (devido a outros canais de rádio ou a sinais eletromagnéticos).

Canais de rádio terrestres podem ser classificados, de modo geral, em dois grupos: os de pequeno alcance, que funcionam em locais próximos, normalmente abrangendo de dez a algumas centenas de metros, e os de longo alcance, que abrangem dezenas de quilômetros.

As tecnologias LAN sem fio descritas na seção 1.2.2 utilizam canais de rádio local; as tecnologias de acesso em telefone celular utilizam canal de rádio de longo alcance. Abordaremos canais de rádio detalhadamente no Capítulo 6.

Canais de rádio por satélite

Um satélite de comunicação liga dois ou mais transmissores-receptores de micro-ondas baseados na Terra, denominados estações terrestres. Ele recebe transmissões em uma faixa de frequência, gera novamente o sinal usando um repetidor (sobre o qual falaremos a seguir) e o transmite em outra frequência. Satélites podem prover taxas de transmissão na faixa de gigabits por segundo. Dois tipos de satélites são usados para comunicações: satélites geoestacionários e satélites de órbita baixa (LEO).

Os satélites geoestacionários ficam permanentemente sobre o mesmo lugar da Terra. Essa presença estacionária é conseguida colocando-se o satélite em órbita a 36 mil quilômetros acima da superfície terrestre. Essa enorme distância da estação terrestre ao satélite e de seu caminho de volta à estação terrestre traz um substancial atraso de propagação de sinal de 280 milissegundos. Mesmo assim, enlaces por satélite, que podem funcionar a velocidades de centenas de Mbps, são frequentemente usados em redes de telefonia e no backbone da Internet.

Os satélites de baixa órbita são posicionados muito mais próximos da Terra e não ficam permanentemente sobre um único lugar. Eles giram ao redor da Terra (exatamente como a Lua) e podem se comunicar uns com os outros e com estações terrestres. Para prover cobertura contínua em determinada área, é preciso colocar muitos satélites em órbita. Hoje, existem muitos sistemas de comunicação de baixa altitude em desenvolvimento. A página da Web referente à constelação de satélites da Lloyd [Wood, 2009] fornece e coleta informações sobre esses sistemas para comunicações. A tecnologia de satélites de órbita baixa poderá ser utilizada para acesso à Internet no futuro.

1.3 O núcleo da rede

Após termos examinado a periferia da Internet, vamos agora nos aprofundar mais no núcleo da rede — a rede de comutadores de pacote e enlaces que interconectam os sistemas finais da Internet. Os núcleos da rede aparecem destacados em cinza na Figura 1.11.

1.3.1 Comutação de circuitos e comutação de pacotes

Há duas abordagens fundamentais para locomoção de dados através de uma rede de enlaces e comutadores: comutação de circuitos e comutação de pacotes. Em redes de comutação de circuitos, os recursos necessários ao longo de um caminho (buffers, taxa de transmissão de enlaces) para prover comunicação entre os sistemas finais são reservados pelo período da sessão de comunicação entre os sistemas finais. Em redes de comutação de pacotes, esses recursos não são reservados; as mensagens de uma sessão usam os recursos por demanda e, como consequência, poderão ter de esperar (isto é, entrar na fila) para conseguir acesso a um enlace de comunicação. Como simples analogia, considere dois restaurantes — um que exige e outro que não exige nem aceita reserva. Se quisermos ir ao restaurante que exige reserva, teremos de passar pelo aborrecimento de telefonar antes de sair de casa. Mas, quando chegarmos lá, poderemos, em princípio, ser imediatamente atendidos e servidos. No restaurante que não exige reserva, não precisaremos nos dar ao trabalho de reservar mesa, porém, quando lá chegarmos, talvez tenhamos de esperar.

As onipresentes redes de telefonia são exemplos de redes de comutação de circuitos. Considere o que acontece quando uma pessoa quer enviar a outra uma informação (por voz ou por fax) por meio de uma rede telefônica. Antes que o remetente possa enviar a informação, a rede precisa estabelecer uma conexão entre o remetente e o destinatário. Essa é uma conexão forte, na qual os comutadores existentes no caminho entre o remetente e o destinatário mantêm o estado dessa conexão. No jargão da telefonia, essa conexão é denominada circuito. Quando a rede estabelece o circuito, também reserva uma taxa de transmissão constante nos enlaces da rede durante o período da conexão. Visto que foi reservada largura de banda para essa conexão remetente-destinatário, o remetente pode transferir dados ao destinatário a uma taxa constante garantida.

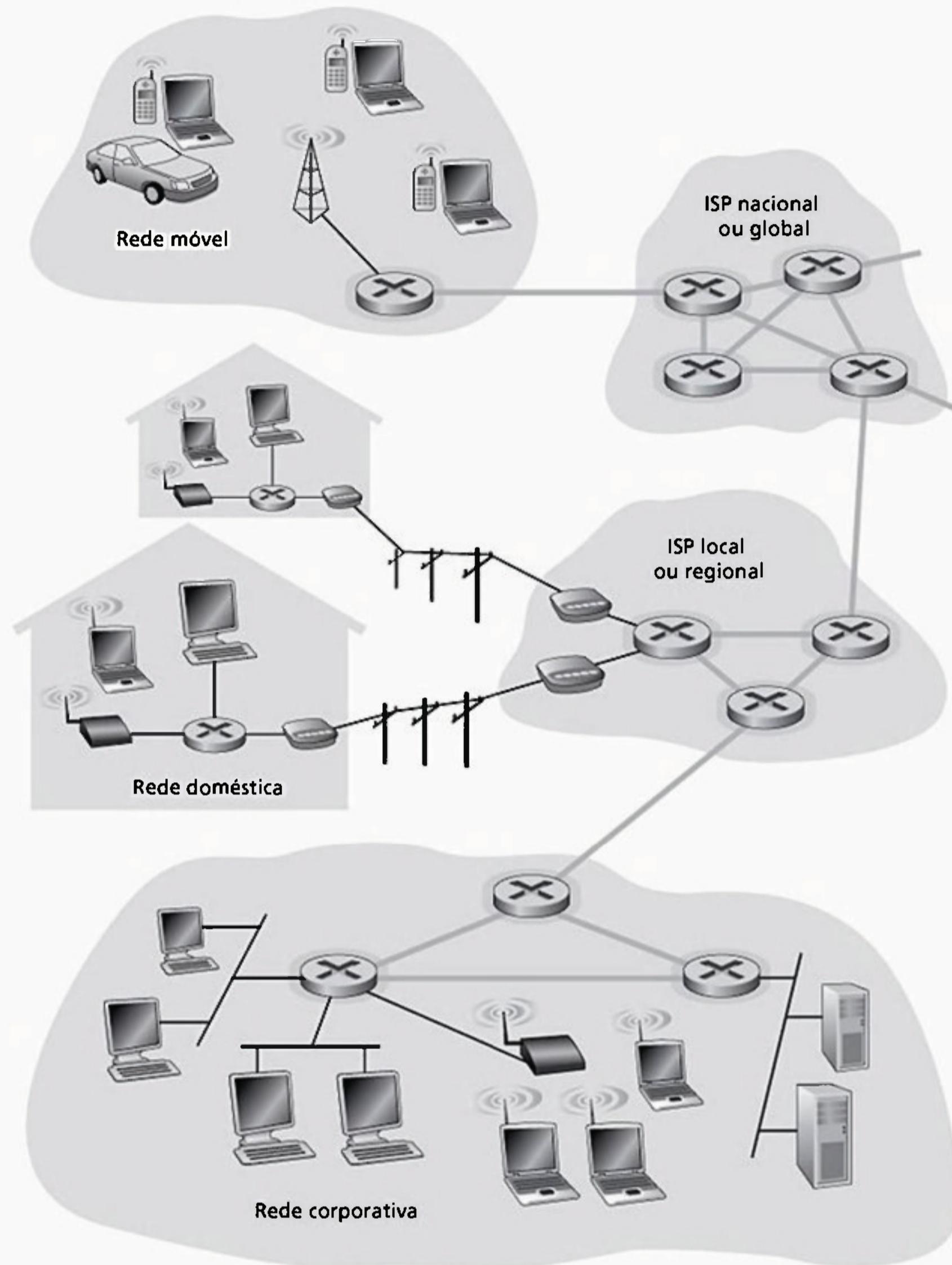


Figura 1.11 O núcleo da rede

Hoje, a Internet é a quintessência das redes de comutação de pacotes. Considere o que ocorre quando um sistema final quer enviar um pacote a outro sistema final pela Internet. Como acontece na comutação de circuitos, o pacote é transmitido por uma série de enlaces de comunicação. Mas, na comutação de pacotes, o pacote é enviado à rede sem reservar nenhuma largura de banda. Se um dos enlaces estiver congestionado porque outros pacotes precisam ser transmitidos pelo enlace ao mesmo tempo, então nosso pacote terá de esperar em um buffer na extremidade de origem do enlace de transmissão e sofrerá um atraso. A Internet faz o *melhor esforço* para entregar os dados prontamente, mas não dá nenhuma garantia.

Nem todas as redes de telecomunicação podem ser classificadas exataamente como redes de comutação de circuitos puras ou redes de comutação de pacotes puras. Não obstante, essa classificação fundamental em redes de comutação de pacotes e de comutação de circuitos é um excelente ponto de partida para a compreensão da tecnologia de redes de telecomunicação.

Comutação de circuitos

Este livro é sobre redes de computadores, Internet e comutação de pacotes, e não sobre redes telefônicas e comutação de circuitos. Mesmo assim, é importante entender por que a Internet e outras redes de computadores usam comutação de pacotes, e não a tecnologia mais tradicional de comutação de circuitos utilizada nas redes telefônicas. Por essa razão, examinaremos agora resumidamente a comutação de circuitos.

A Figura 1.12 ilustra uma rede de comutação de circuitos. Nessa rede, os quatro comutadores de circuitos estão interconectados por quatro enlaces. Cada um desses enlaces tem n circuitos, de modo que cada um pode suportar n conexões simultâneas. Cada um dos sistemas finais (por exemplo, PCs e estações de trabalho) está conectado diretamente a um dos circuitos. Quando dois sistemas finais querem se comunicar, a rede estabelece uma conexão sim a sim dedicada entre os dois sistemas finais. (É claro que também são possíveis chamadas em conferência entre mais de dois equipamentos. Mas, para simplificar, por enquanto vamos supor que haja somente dois sistemas finais para cada conexão.) Assim, para que o sistema final A envie mensagens ao sistema final B, a rede deve primeiramente reservar um circuito em cada um dos dois enlaces. Como cada enlace tem n circuitos, para cada enlace usado pela conexão sim a sim, esta fica com uma fração $1/n$ da largura de banda do enlace durante o período da conexão.

Multiplexação em redes de comutação de circuitos

Um circuito é implementado em um enlace por multiplexação por divisão de frequência (*frequency-division multiplexing* — FDM) ou por multiplexação por divisão de tempo (*time-division multiplexing* — TDM). Com FDM, o espectro de frequência de um enlace é compartilhado entre as conexões estabelecidas através desse enlace. Especificamente, o enlace reserva uma banda de frequência para cada conexão durante o período da ligação. Em redes telefônicas, a largura dessa banda de frequência normalmente é 4 kHz (isto é, 4 mil Hertz ou 4 mil ciclos por segundo). Estações de rádio FM também usam FDM para compartilhar o espectro de frequência entre 88 MHz e 108 MHz, sendo atribuída para cada estação uma banda de frequência específica.

Em um enlace TDM, o tempo é dividido em quadros de duração fixa, e cada quadro é dividido em um número fixo de compartimentos (*slots*). Quando estabelece uma conexão por meio de um enlace, a rede dedica à conexão um compartimento de tempo em cada quadro. Esses compartimentos são reservados para o uso exclusivo dessa conexão, e um dos compartimentos de tempo (em cada quadro) fica disponível para transmitir os dados dela.

A Figura 1.13 ilustra as técnicas FDM e TDM para um enlace de rede específico que suporta até quatro circuitos. Para FDM, o domínio de frequência é segmentado em quatro faixas, cada uma com largura de banda de 4 kHz. Para TDM, o domínio de tempo é segmentado em quadros, cada um com quatro compartimentos

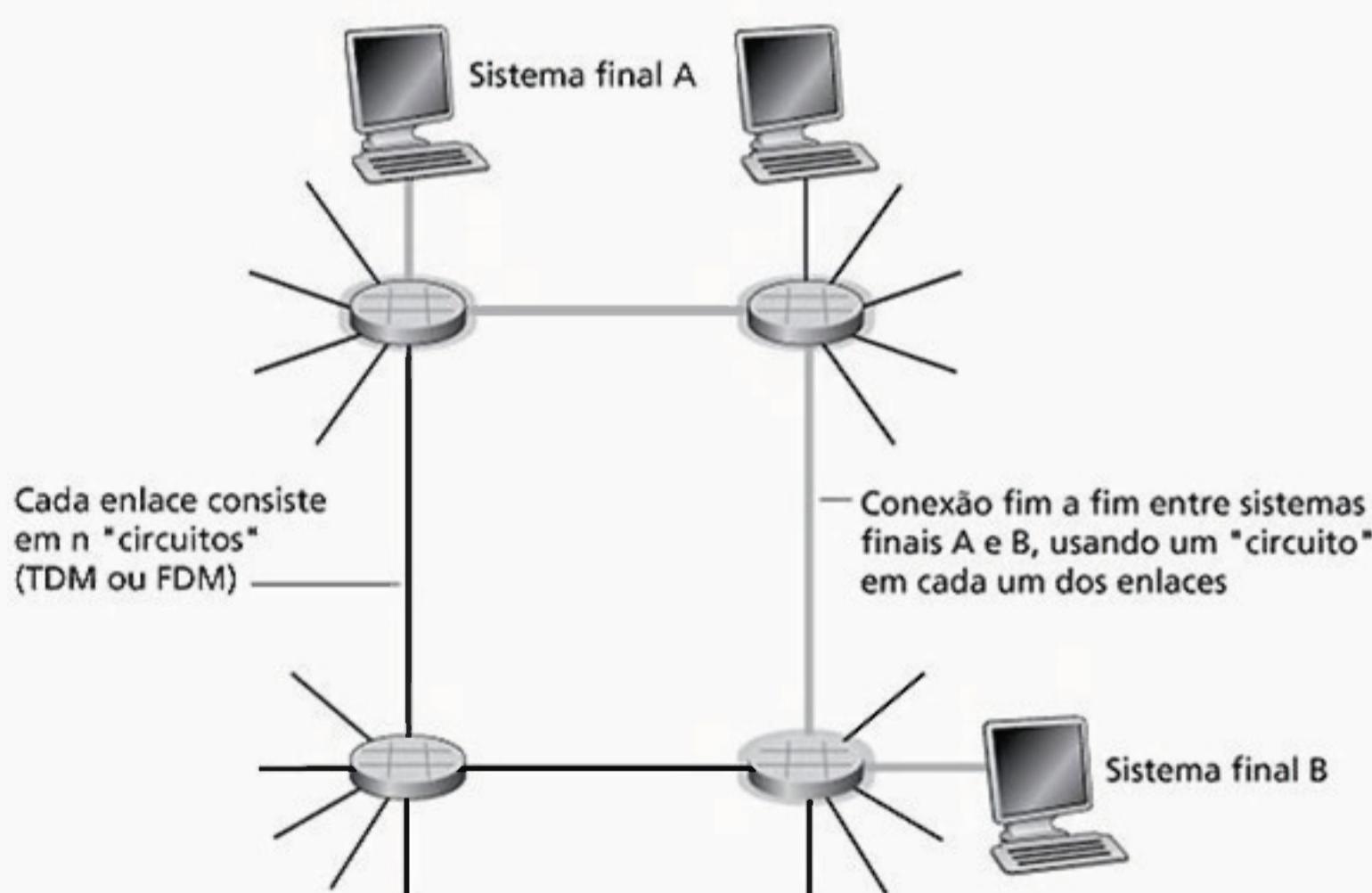


Figura 1.12 Uma rede simples de comutação de circuitos composta de quatro comutadores de circuito e quatro enlaces

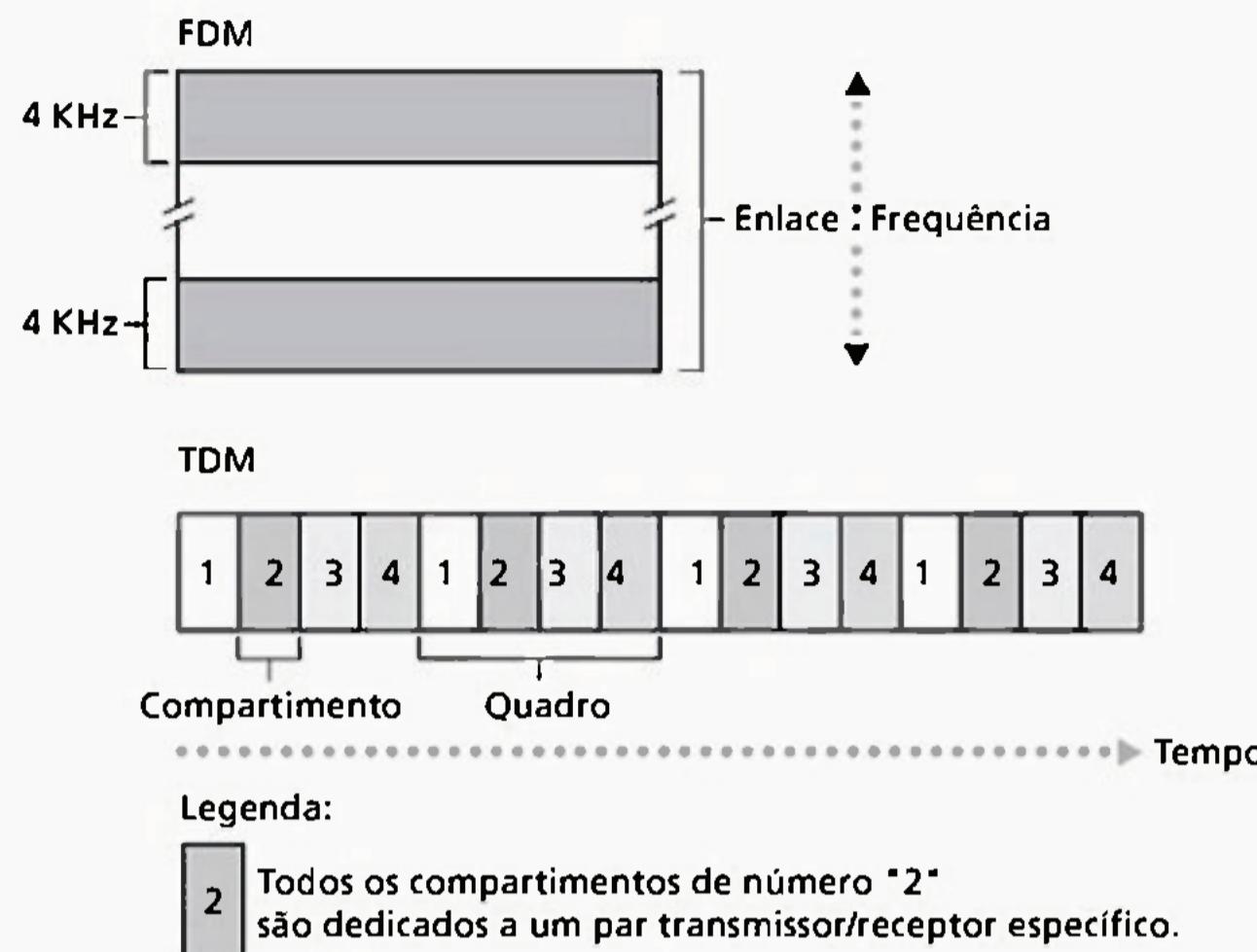


Figura 1.13 Com FDM, cada circuito dispõe continuamente de uma fração da largura de banda. Com TDM, cada circuito dispõe de toda a largura de banda periodicamente, durante breves intervalos de tempo (isto é, durante compartimentos de tempo)

de tempo; a cada circuito é designado o mesmo compartimento dedicado nos quadros sucessivos TDM. Para TDM, a taxa de transmissão de um circuito é igual à taxa do quadro multiplicada pelo número de bits em um compartimento. Por exemplo, se o enlace transmite 8 mil quadros por segundo e cada compartimento consiste em 8 bits, então a taxa de transmissão de um circuito é 64 kbps.

Os defensores da comutação de pacotes sempre argumentaram que comutação de circuitos é desperdício, porque os circuitos dedicados ficam ociosos durante períodos de silêncio. Por exemplo, quando um dos participantes de uma conversa telefônica para de falar, os recursos ociosos da rede (bandas de frequências ou compartimentos nos enlaces ao longo da rota da conexão) não podem ser usados por outras conexões em curso. Para um outro exemplo de como esses recursos podem ser subutilizados, considere um radiologista que usa uma rede de comutação de circuitos para acessar remotamente uma série de radiografias. Ele estabelece uma conexão, requisita uma imagem, examina-a e, em seguida, solicita uma nova imagem. Recursos de rede são atribuídos à conexão, mas não utilizados (isto é, são desperdiçados) durante o período em que o radiologista examina a imagem. Defensores da comutação de pacotes também gostam de destacar que estabelecer circuitos sim a sim e reservar larguras de banda sim a sim é complicado e exige softwares complexos de sinalização para coordenar a operação dos comutadores ao longo do caminho sim a sim.

Antes de encerrarmos esta discussão sobre comutação de circuitos, vamos examinar um exemplo numérico que deverá esclarecer melhor o assunto. Vamos considerar o tempo que levamos para enviar um arquivo de 640 kbits do sistema final A ao sistema final B por uma rede de comutação de circuitos. Suponha que todos os enlaces da rede usem TDM de 24 compartimentos e tenham uma taxa de 1,536 Mbps. Suponha também que um circuito sim a sim leva 500 milissegundos para ser ativado antes que A possa começar a transmitir o arquivo. Em quanto tempo o arquivo será enviado? Cada circuito tem uma taxa de transmissão de $(1,536 \text{ Mbps})/24 = 64 \text{ kbps}$; portanto, demorará $(640 \text{ kbits})/64 \text{ kbps} = 10 \text{ segundos}$ para transmitir o arquivo. A esses 10 segundos adicionamos o tempo de ativação do circuito, resultando 10,5 segundos para o envio. Observe que o tempo de transmissão é independente do número de enlaces: o tempo de transmissão seria 10 segundos se o circuito sim a sim passasse por um ou por uma centena de enlaces. (O atraso real sim a sim também inclui um atraso de propagação; ver Seção 1.4.)

Comutação de pacotes

Aplicações distribuídas trocam mensagens ao desempenhar suas tarefas. Mensagens podem conter qualquer característica que o projetista do protocolo queira. Podem desempenhar uma função de controle (por exemplo, as

mensagens 'oi' no nosso exemplo de comunicação entre pessoas) ou podem conter dados, tal como uma mensagem de e-mail, uma imagem JPEG ou um arquivo de áudio MP3. Em redes de computadores modernas, o originador fragmenta mensagens longas em porções de dados menores denominadas pacotes. Entre origem e destino, cada um desses pacotes percorre enlaces de comunicação e comutadores de pacotes (há dois tipos principais de comutadores de pacotes: roteadores e comutadores de camada de enlace). Pacotes são transmitidos por cada enlace de comunicação a uma taxa igual à de transmissão total do enlace.

A maioria dos comutadores de pacotes armazena e reenvia os pacotes nas entradas dos enlaces, numa técnica conhecida como armazena-e-reenvia e de acordo com a qual o comutador deve receber o pacote inteiro antes de poder começar a transmitir o primeiro bit do pacote para o enlace de saída. Assim, comutadores de pacotes apresentam um atraso de armazenagem e reenvio na entrada de cada enlace ao longo da rota do pacote. Vamos considerar agora quanto tempo demora para enviar um pacote de L bits de um sistema final para outro por uma rede de comutação de pacotes. Suponha que haja Q enlaces entre os dois sistemas finais, cada um com taxa de Rbps. Admita que atrasos de fila e de propagação sim a sim sejam desprezíveis e que não haja estabelecimento de conexão. Primeiramente o pacote deve ser transmitido para o primeiro enlace que se origina do sistema final A, o que leva L/R segundos. Em seguida, ele tem de ser transmitido por cada um dos $Q - 1$ enlaces remanescentes, isto é, deve ser armazenado e reenviado $Q - 1$ vezes. Portanto, o atraso total é QL/R .

A cada comutador de pacotes estão ligados vários enlaces. Para cada um destes, o comutador de pacotes tem um buffer de saída (também denominado fila de saída), que armazena pacotes prestes a serem enviados pelo roteador para aquele enlace. Os buffers de saída desempenham um papel fundamental na comutação de pacotes. Se um pacote que está chegando precisa ser transmitido por um enlace, mas o enlace ocupado com a transmissão de outro pacote, deve aguardar no buffer de saída. Desse modo, além dos atrasos de armazenagem e reenvio, os pacotes sofrem atrasos de fila no buffer de saída. Esses atrasos são variáveis e dependem do grau de congestionamento da rede. Como o espaço do buffer é finito, um pacote que está chegando pode encontrá-lo completamente lotado de outros pacotes que estão esperando transmissão. Nesse caso, ocorrerá uma perda de pacote — um pacote que está chegando ou um dos que já estão na fila é descartado. Voltando à analogia do restaurante apresentada anteriormente nesta seção, o atraso de fila é análogo ao tempo gasto no bar do restaurante esperando uma mesa, enquanto a perda de pacote é análoga a ouvir do garçom que devemos desistir porque já há muitas pessoas ali.

A Figura 1.14 ilustra uma rede simples de comutação de pacotes. Nessa figura e nas subsequentes, pacotes são representados por placas tridimensionais. A largura de uma placa representa o número de bits no pacote. Nessa figura todos os pacotes têm a mesma largura, portanto, o mesmo tamanho. Suponha que os sistemas finais A e B estejam enviando pacotes ao sistema final E. Os sistemas finais A e B primeiramente enviarão seus pacotes por

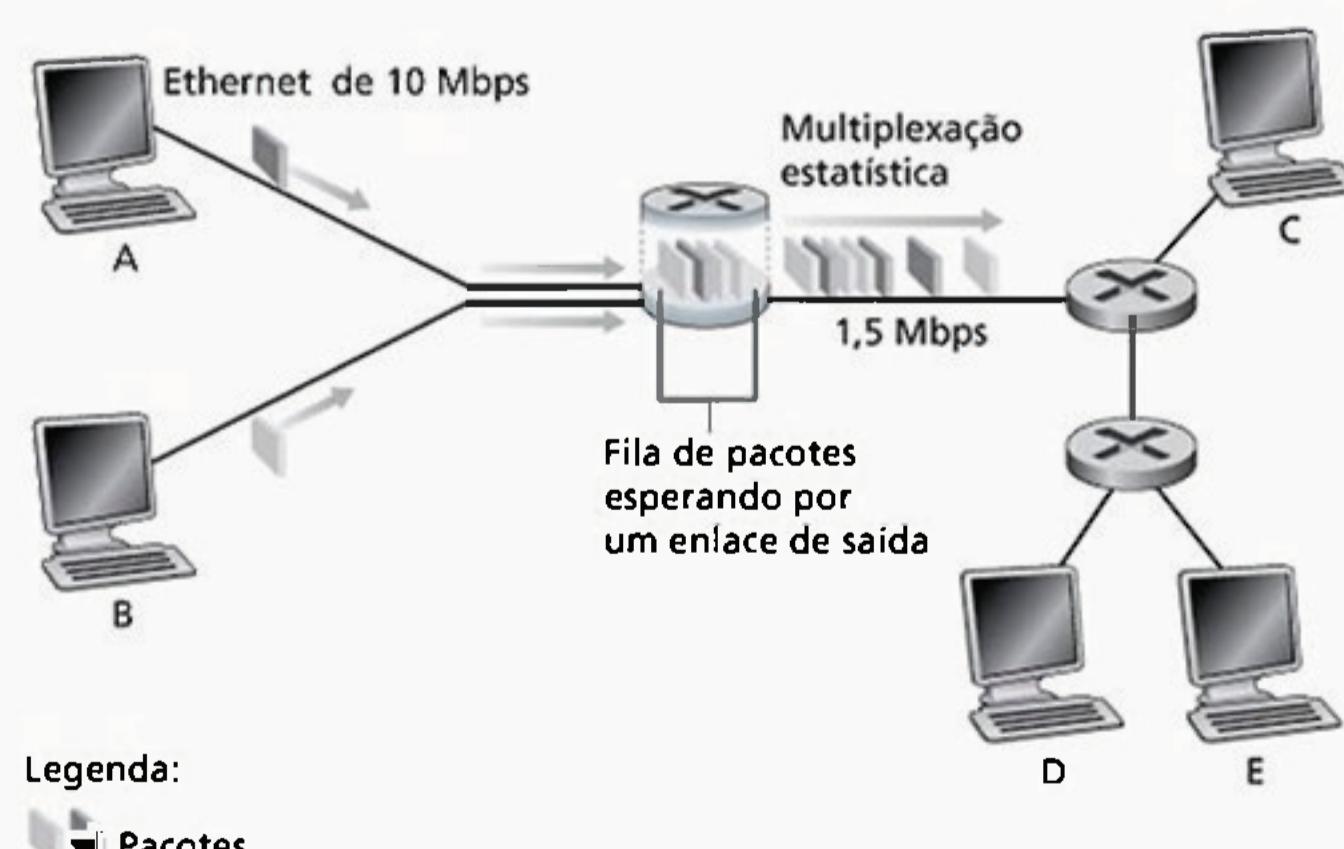


Figura 1.14 Comutação de pacotes

enlaces Ethernet de 10 Mbps até o primeiro comutador de pacotes, que vai direcioná-los para o enlace de 1,5 Mbps. Se a taxa de chegada de pacotes ao comutador for maior do que a taxa com que o comutador pode reenviar pacotes pelo enlace de saída de 1,5 Mbps, ocorrerá congestionamento, pois os pacotes formarão uma fila no buffer de saída do enlace antes de ser transmitidos para o enlace. Vamos analisar esse atraso mais detalhadamente na Seção 1.4.

Comutação de pacotes versus comutação de circuitos: multiplexação estatística

Agora que já descrevemos comutação de pacotes e comutação de circuitos, vamos comparar as duas. Opositores da comutação de pacotes frequentemente argumentam que ela não é adequada para serviços de tempo real (por exemplo, ligações telefônicas e videoconferência) por causa de seus atrasos simétricos variáveis e imprevisíveis (que se devem principalmente a atrasos de fila variáveis e imprevisíveis). Defensores da comutação de pacotes argumentam que (1) ela oferece melhor compartilhamento de banda do que comutação de circuitos e (2) sua implementação é mais simples, mais eficiente e mais barata do que a implementação de comutação de circuitos. Uma discussão interessante sobre comutação de pacotes e comutação de circuitos pode ser encontrada em [Molinero-Fernandez, 2002]. De modo geral, quem não gosta de perder tempo fazendo reserva de mesa em restaurantes prefere comutação de pacotes à comutação de circuitos.

Por que a comutação de pacotes é mais eficiente? Vamos examinar um exemplo simples. Suponha que usuários compartilhem um enlace de 1 Mbps. Suponha também que cada usuário alterne períodos de atividade, quando gera dados a uma taxa constante de 100 kbps, e de inatividade, quando não gera dados. Suponha ainda que o usuário esteja ativo apenas 10 por cento do tempo (e fique ocioso, tomando cafezinho, durante os restantes 90 por cento). Com comutação de circuitos, devem ser reservados 100 kbps para *cada usuário* durante todo o tempo. Por exemplo, com TDM, se um quadro de um segundo for dividido em 10 compartimentos de tempo de 100 milissegundos cada, então seria alocado um compartimento de tempo por quadro a cada usuário.

Desse modo, o enlace pode suportar somente 10 ($= 1 \text{ Mbps}/100 \text{ kbps}$) usuários simultaneamente. Com comutação de pacotes, a probabilidade de haver um usuário específico ativo é 0,1 (isto é, 10 por cento). Se houver 35 usuários, a probabilidade de haver 11 ou mais usuários ativos simultaneamente é aproximadamente 0,0004. (O Problema 7 dos Exercícios de Fixação demonstra como essa probabilidade é calculada.) Quando houver dez ou menos usuários ativos simultaneamente (a probabilidade de isso acontecer é 0,9996), a taxa agregada de chegada de dados é menor ou igual a 1 Mbps, que é a taxa de saída do enlace. Assim, quando houver dez ou menos usuários ativos, pacotes de usuários fluirão pelo enlace essencialmente sem atraso, como é o caso na comutação de circuitos. Quando houver mais de dez usuários ativos simultaneamente, a taxa agregada de chegada de pacotes excederá a capacidade de saída do enlace, e a fila de saída começará a crescer. (E continuará a crescer até que a velocidade agregada de entrada caia novamente para menos de 1 Mbps, ponto em que o comprimento da fila começará a diminuir.) Como a probabilidade de haver mais de dez usuários ativos simultaneamente é ínfima nesse exemplo, a comutação de pacotes apresenta, essencialmente, o mesmo desempenho da comutação de circuitos, mas o faz para mais de três vezes o número de usuários.

Vamos considerar agora um segundo exemplo simples. Suponha que haja dez usuários e que um deles repentinamente gere mil pacotes de mil bits, enquanto os outros nove permanecem inativos e não geram pacotes. Com comutação de circuitos TDM de dez compartimentos de tempo por quadro, e cada quadro consistindo em mil bits, o usuário ativo poderá usar somente seu único compartimento por quadro para transmitir dados, enquanto os nove compartimentos restantes em cada quadro continuarão ociosos. Dez segundos se passarão antes que todo o milhão de bits de dados do usuário ativo seja transmitido. No caso da comutação de pacotes, o usuário ativo poderá enviá-los continuamente à taxa total de 1 Mbps, visto que não haverá outros usuários gerando pacotes que precisem ser multiplexados com os pacotes do usuário ativo. Nesse caso, todos os dados do usuário ativo serão transmitidos dentro de 1 segundo.

Os exemplos acima ilustram duas maneiras pelas quais o desempenho da comutação de pacotes pode ser superior à da comutação de circuitos. Também destacam a diferença crucial entre as duas formas de compartilhar a taxa de transmissão de um enlace entre várias correntes de bits. Comutação de circuitos aloca previamente a utilização do enlace de transmissão independentemente de demanda, com desperdício de tempo de enlace desnecessário alocado e não utilizado. Comutação de pacotes, por outro lado, aloca utilização de enlace por

demanda. A capacidade de transmissão do enlace será compartilhada pacote por pacote somente entre usuários que tenham pacotes que precisam ser transmitidos pelo enlace. Tal compartilhamento de recursos por demanda (e não por alocação prévia) às vezes é denominado multiplexação estatística de recursos.

Embora tanto a comutação de pacotes quanto a comutação de circuitos predominem nas redes de telecomunicação de hoje, a tendência é, sem dúvida, a comutação de pacotes. Até mesmo muitas das atuais redes de telefonia de comutação de circuitos estão migrando lentamente para a comutação de pacotes. Em especial, redes telefônicas frequentemente usam comutação de pacotes na parte cara de uma chamada telefônica para o exterior, isto é, na parte que não é processada em território nacional.

1.3.2 Como os pacotes percorrem as redes de comutadores de pacotes?

Anteriormente dissemos que um roteador conduz um pacote que chega em um de seus enlaces de comunicação para outro enlace. Mas como o roteador determina o enlace que deve conduzir o pacote? Na verdade, isso é feito de diferentes maneiras por diferentes tipos de rede de computadores. Neste capítulo introdutório, descreveremos uma abordagem popular, a saber, a abordagem empregada pela Internet.

Na Internet, cada pacote que atravessa a rede contém o seu endereço de destino em seu cabeçalho. Como os endereços postais, esse endereço possui uma estrutura hierárquica. Quando um pacote chega à um roteador na rede, o roteador examina uma parte do endereço de destino do pacote e conduz o pacote a um roteador adjacente. Especificamente falando, cada roteador possui uma base de encaminhamento que mapeia o endereço de destino (ou partes desse endereço) para enlaces de saída. Quando um pacote chega ao roteador, este examina o endereço e busca sua base utilizando esse endereço de destino para encontrar o enlace de saída apropriado. O roteador, então, direciona o pacote ao enlace de saída.

Vimos que um roteador usa um endereço de destino do pacote para indexar uma base de encaminhamento e determinar o enlace de saída apropriado. Mas essa afirmação traz ainda outra questão: como as bases de encaminhamento se configuram? Elas são configuradas manualmente em cada roteador ou a Internet utiliza um procedimento mais automático? Essa questão será estudada mais profundamente no Capítulo 4. Mas para aguçar seu apetite, observe que a Internet possui um número especial de protocolos de roteamento que são utilizados para configurar automaticamente as bases de encaminhamento. Um protocolo de roteamento pode, por exemplo, determinar o caminho mais curto de cada roteador a cada destino e utilizar os resultados desse caminho para configurar as bases de encaminhamento nos roteadores.

O processo de roteamento sim a sim é semelhante a um motorista que não quer fazer uso do mapa, preferindo pedir informações. Por exemplo, suponha que Joe vai dirigir da Filadélfia para 156 Lakeside Drive, em Orlando, Flórida. Primeiro, Joe vai ao posto de gasolina de seu bairro e pergunta como chegar a 156 Lakeside Drive, em Orlando, Flórida. O frentista do posto extrai a palavra Flórida do endereço e diz que Joe precisa pegar a interestadual 1-95 South, cuja entrada fica ao lado do posto. Ele também diz a Joe para pedir outras informações assim que chegar a Flórida. Então, Joe pega a I-95 South até chegar a Jacksonville, na Flórida, onde pede mais informações a outro frentista. Este extrai a palavra Orlando do endereço e diz a Joe para continuar na I-95 até Daytona Beach, e lá se informar novamente. Em Daytona Beach, outro frentista também extrai a palavra Orlando do endereço e pede para que ele pegue a I-4 diretamente para Orlando. Joe segue suas orientações e chega a uma saída para Orlando. Ele vai até outro posto de gasolina, e desta vez o atendente extrai a palavra Lakeside Drive do endereço e diz a ele qual estrada seguir para Lakeside Drive. Assim que Joe chega a Lakeside Drive, ele pergunta a uma criança de bicicleta como chegar a seu destino. A criança extrai o número 156 do endereço e aponta para a casa. Joe finalmente chega a seu destino final.

Na analogia acima, os frentistas dos postos e a criança na bicicleta são semelhantes aos roteadores. As bases de encaminhamento, que estão no cérebro deles, foram configuradas por anos de experiência.

Você gostaria de ver a rota sim a sim que os pacotes realizam na Internet? Convidamos você a colocar a mão na massa e interagir com o programa Traceroute, visitando o site <http://www.traceroute.org>. (Para detalhes sobre o Traceoute, veja a Seção 1.4.)

1.3.3 ISPs e backbones da Internet

Vimos anteriormente que sistemas finais (PCs de usuários, PDAs, servidores Web, servidores de correio eletrônico e assim por diante) conectam-se à Internet por meio de um provedor local. O provedor pode fornecer uma conectividade tanto com fio como sem fio, utilizando um conjunto de tecnologias de acesso, incluindo DSL, modem de cabo, FTTH, Wi-Fi, telefone celular e WiMAX. Observe que o provedor local não precisa ser uma operadora de telefonia ou uma empresa de TV a cabo: pode ser, por exemplo, uma universidade (que oferece acesso à Internet para os alunos, a equipe e o corpo docente) ou uma empresa (que oferece acesso para seus funcionários). Mas conectar usuários finais e provedores de conteúdo a redes de acesso é apenas uma pequena peça do quebra-cabeça que é conectar as centenas de milhões de usuários e centenas de milhares de redes que compõem a Internet. A Internet é uma *rede de redes* — entender essa frase é a chave para resolver esse jogo.

Na Internet pública, redes de acessos situadas na borda da Internet são conectadas ao restante da rede segundo uma hierarquia de níveis de ISPs, como mostra a Figura 1.15. Os ISPs de acesso estão no nível mais baixo dessa hierarquia. No topo dela está um número relativamente pequeno de ISPs denominados ISPs de nível 1. Sob muitos aspectos, um ISP de nível 1 é igual a qualquer rede — tem enlaces e roteadores e está conectado a outras redes. Mas, considerando-se outros aspectos, ISPs de nível 1 são especiais. As velocidades de seus enlaces muitas vezes alcançam 622 Mbps ou mais, tendo os maiores deles enlaces na faixa de 2,5 a 10 Gbps. Consequentemente, seus roteadores são capazes de transmitir pacotes a taxas extremamente altas. ISPs de nível 1 também apresentam as seguintes características:

- conectam-se diretamente a *cada* um dos outros ISPs de nível 1;
- conectam-se a um grande número de ISPs de nível 2 e a outras redes clientes;
- cobertura internacional.

Esses ISPs também são conhecidos como redes de backbone da Internet. Citamos, como exemplos, Sprint, MCI (anteriormente UUNet/WorldCom), AT&T, Level3, Qwest e Cable & Wireless. Em meados de 2002, a WorldCom era, de longe, o maior ISP de nível 1 existente — mais de duas vezes maior do que seu rival mais próximo, segundo diversas medições de tamanho [Telegraphy, 2002]. O interessante é que nenhum grupo san-

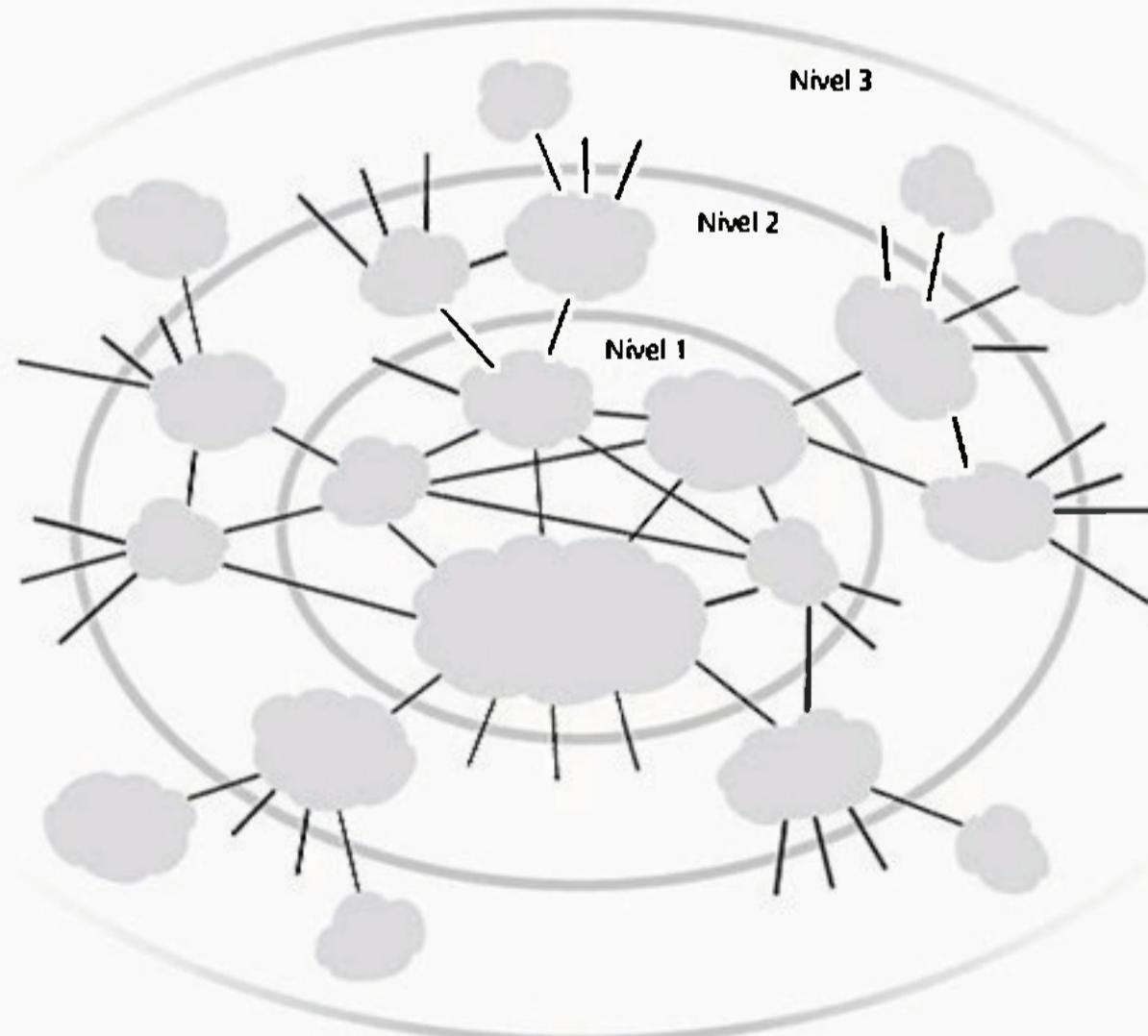


Figura 1.15 Interconexão de ISPs