

# Unidade VI

## 6 WIMAX, MULTIPLEXAÇÃO, PDH E SDH

### 6.1 A arquitetura de rede WiMAX

A arquitetura de rede WiMAX se define como o sistema após a interface Wi-Fi para habilitar uma rede fim a fim completa a ser alcançada. A fim de que elementos do equipamento de rede possam ser usados a partir de diferentes fornecedores, é necessário definir a arquitetura de rede WiMAX que é comum a todas as redes WiMAX. Dessa forma, as economias de escala podem ser adquiridas junto com redes robustas que são capazes de executar com fiabilidade em todas as condições.

O padrão WiMAX básico não define a rede WiMAX para conectividade fim a fim. No entanto, devido à necessidade de uma arquitetura de rede WiMAX padrão, o grupo de trabalho do Fórum WiMAX de rede desenvolveu um padrão para definir a arquitetura de rede WiMAX.

O padrão agora utilizado está disponível a partir do Fórum WiMAX, documento WMF-T32-002-R010v04, de 3 de fevereiro de 2009.

A arquitetura WiMAX desenvolvida pelos suportes de formulário WiMAX é uma arquitetura de rede unificada para oferecer suporte a operação fixa, itinerante e móvel. Ela é baseada em um modelo IP completo e composta de três principais elementos ou áreas:

- Estações remotas ou móveis: são os equipamentos de usuário que podem ser móveis ou fixos e podem estar localizados nas instalações do usuário.
- Rede de serviços de acesso (ASN): essa é a área da rede WiMAX que forma a rede de acesso via rádio na borda e compreende uma ou mais estações base e um ou mais *gateways* ASN.
- Rede de serviços de conectividade (CSN): essa é a parte da rede WiMAX que fornece a conectividade IP e todas as funções de rede IP Core. É o que pode ser denominado rede central em linguagem celular.

### 6.2 A camada de rede WiMAX

O modelo de referência WiMAX envolve a arquitetura da rede global WiMAX e compreende um número de diferentes entidades que compõem as diferentes áreas principais descritas. Elas incluem as seguintes entidades:

- SS/Mobile, MS (estação dos assinantes): a SS pode frequentemente ser referida como o CPE (equipamento de instalações do cliente), que toma uma variedade de formas e pode ser

denominado CPE interno ou CPE Wi-Fi (a terminologia é autoexplicativa). O CPE Wi-Fi tem a vantagem de fornecer o melhor desempenho em consequência da melhor posição da antena, visto que o CPE interno pode ser instalado pelo usuário. As estações móveis também podem ser usadas e se encontram frequentemente na forma de um aparato portátil.

- **BS (base station):** a estação base forma um elemento essencial da rede WiMAX. É responsável por fornecer a interface Wi-Fi para o assinante e estações móveis. Ela fornece funcionalidades adicionais em termos de gerenciamento de micromobilidade, como acionamento de entrega e estabelecimento de túneis, gerenciamento de recursos de rádio, aplicação de políticas de QoS, classificação de tráfego, DHCP (protocolo de controle dinâmico de *host*) *proxy*, gerenciamento de chaves, gerenciamento de sessão e gerenciamento de grupos de *multicast*.
- **ASN-GW (ASN gateway):** o *gateway* ASN dentro da arquitetura de rede WiMAX normalmente atua como um ponto de agregação de tráfego de camada 2 dentro do ASN geral. O ASN-GW também pode fornecer funções adicionais que incluem gerenciamento e paginação de local intra-ASN, gerenciamento de recursos de rádio e controle de admissão, cache de perfis de assinantes e chaves de criptografia. O ASN-GW também pode incluir a funcionalidade do cliente AAA, estabelecimento e gerenciamento do túnel de mobilidade com estações base, QoS e aplicação de políticas, funcionalidade de agente externo para IP móvel e encaminhamento para o CSN selecionado.
- **HA (home agent):** o agente doméstico dentro da rede WiMAX está localizado dentro do CSN. Com o IP móvel que dá forma a um elemento-chave dentro da tecnologia de WiMAX, o agente *home* trabalha junto com um "agente estrangeiro", tal como o *gateway* de ASN, para fornecer uma solução de IP móvel fim a fim eficiente. O *home agent* serve como um ponto de âncora para assinantes, fornecendo *roaming* seguro com recursos de QoS.
- **AAA (autenticação, autorização e servidor de bilhetagem):** como em qualquer sistema de comunicação ou sem fio que exija serviços de assinatura, é usado um servidor de autenticação, autorização e bilhetagem. Isso está incluído no CSN.

### 6.3 Segurança

Os elementos essenciais para a segurança de WiMAX, incluindo criptografia e autenticação e as maneiras que são implementadas, assim como qualquer segurança do sistema, são um elemento-chave dentro do sistema global WiMAX. A segurança do WiMAX tem de ser implementada de forma a proporcionar uma proteção suficiente contra a intrusão e outras formas de acesso não autorizado sem dificultar a operação global. Assim, a segurança de WiMAX foi incorporada no coração do sistema para assegurar que seja integrada perfeitamente e forneça uma solução eficaz.

A segurança WiMAX utiliza um número de técnicas avançadas, incluindo PKMv2, autenticação baseada na criptografia Wi-Fi. É considerável melhorar o nível de segurança que pode ser alcançado. Isso parece desafiador e exige que cada rede adote a segurança dentro do projeto de rede global para conexões externas, bem como nas formas de trabalho.

A segurança WiMAX usa o IP como o mecanismo de transporte principal. Como resultado, as medidas de segurança WiMAX precisam incorporar não só os requisitos de segurança tradicionais para um sistema de telecomunicações sem fio, mas também os relacionados ao uso de sistemas IP.

Em vista da necessidade de um alto nível de segurança WiMAX, os grupos de trabalho IEEE 802.16 incorporaram medidas de segurança no padrão durante os estágios de conceito para neutralizar as ameaças de segurança WiMAX. A segurança de WiMAX foi incorporada no padrão original como um acréscimo em um estágio mais antigo. Ao adotar essa abordagem, a segurança de WiMAX se tornou mais eficaz ao ser menos intrusiva para o usuário.

Os elementos de segurança do WiMAX estão incluídos no padrão e caem em quatro principais elementos: autenticação do dispositivo do utilizador, nível superior de autenticação avançada do utilizador, métodos de encriptação para garantir o controle e sinalização dentro de um cenário IP. Cada uma dessas áreas de segurança WiMAX foi abordada dentro de padrões, mas, mesmo assim, ainda é necessário que as operadoras de rede empreguem boas práticas para garantir que a segurança não seja comprometida. É perfeitamente possível contornar a melhor tecnologia de segurança se os procedimentos operacionais corretos não estiverem em vigor.

As ameaças de segurança devem ser analisadas para desenvolver qualquer sistema de segurança. É necessário compreender os meios pelos quais a segurança pode ser comprometida e, dessa forma, construir as medidas de segurança pertinentes.

Algumas das principais ameaças à segurança WiMAX são resumidas no quadro a seguir:

**Quadro 4 – Ameaças a uma rede WiMAX**

Tipo de descrição de ataque	Detalhes
Homem do meio ( <i>man-in-the-middle</i> )	Essa forma de problema de segurança WiMAX ocorre quando uma estação base é configurada para representar uma estação base em rede, seja apenas para um assinante ou uma representação de dois sentidos entre o assinante e ela.
Compromisso de privacidade	Esse tipo de ataque de segurança assume a forma do invasor, capturando o tráfego de usuário e/ou a sinalização do que está sendo transmitido pelo <i>wireless</i> ou pelos elementos com fio da rede. Esses pacotes podem ser analisados e as informações, extraídas em um momento posterior.
Roubo de serviço	Isso ocorre se os usuários sem acesso autorizado puderem acessar a rede e utilizá-la sem pagamento.
Negação de serviço (físico)	É a degradação do desempenho da rede, interrompendo fisicamente os elementos físicos da rede, por exemplo, bloqueando os canais de rádio utilizados.
Negação de serviço (protocolo)	Essa forma de negação de serviço envolve sobrecarregar a rede ou os recursos do sistema, introduzindo um novo tráfego ou modificando o tráfego existente. Isso acontece quando os <i>sites</i> da internet são maliciosamente alvo de milhões de solicitações para sobrecarregar seus recursos.
Replay	Essa forma de problema de segurança WiMAX ocorre se as mensagens previamente válidas são injetadas no sistema para esgotar recursos ou bloquear usuários válidos.

Embora essas sejam descrições amplas para as principais formas de problemas de segurança WiMAX, todas elas precisam ser endereçadas para que tentativas maliciosas não sejam bem-sucedidas em interromper a rede nem em obter informações ou dados do usuário ou mesmo acesso não autorizado à rede.

### 6.4 Medidas de segurança WiMAX

O padrão WiMAX inclui várias medidas de proteção de segurança para resolver e superar as várias ameaças de segurança WiMAX que são colocadas no sistema. Isso engloba técnicas de autenticação de dispositivo/usuário mútuo, uma ferramenta de gerenciamento de chave flexível, criptografia de tráfego e proteção de mensagens de controle e gerenciamento.

Existem vários protocolos-chave e padrões que são usados como parte da estratégia de segurança global WiMAX:

- PKMv2: é a forma de garantir a privacidade do protocolo de gerenciamento de chaves versão 2. Isso é usado como um protocolo de gerenciamento de chave para o *exchange* criptografado e autorizado de chaves criptográficas para *multicast* e tráfego de difusão.
- EAP: é a força-tarefa de engenharia da internet, protocolo de autenticação extensível que é usado para a autenticação de dispositivo e usuário.
- EAS: é o padrão de criptografia avançado usado para criptografar o tráfego aéreo.

Durante o funcionamento do sistema, as várias medidas de segurança WiMAX são trazidas para jogar nos vários estágios exigidos:

- Autenticação de segurança WiMAX: a autenticação é a capacidade da rede em garantir que os dispositivos de assinante são usuários legítimos e dispositivos a serem conectados à rede.
- Autorização de entrada de rede: ela usa o EAP porque fornece uma estrutura flexível e escalável para autenticação do usuário e dos dispositivos.
- Criptografia de segurança WiMAX: a criptografia de segurança EAS é usada para criptografar o tráfego Wi-Fi. A abordagem de segurança do WiMAX utiliza o modo *counter* com a mensagem de encadeamento de bloco de codificação, CCM, código de autenticação. Com o AES CCM, o remetente gera um valor exclusivo por pacote e envia esse valor para o destinatário. Isso impede ataques do homem-do-meio, porque teria dificuldade em substituir o tráfego. Uma medida adicional introduz o uso da máquina de estado de criptografia de tráfego, a qual usa um mecanismo de atualização de chave periódica para fornecer a transição contínua de chaves.

A segurança WiMAX é capaz de colocar em jogo um número de mecanismos de segurança para garantir um alto nível de segurança. Embora nenhuma medida de segurança possa ser considerada 100% segura, as medidas de segurança WiMAX fornecem um nível de segurança muito elevado. Desde

que os processos e procedimentos do operador também sejam seguros, o nível global de segurança de WiMAX deve ser suficientemente alto para a maioria das aplicações.

### 6.5 Testes de conformidade

O WiMAX é uma tecnologia de comunicação de banda larga sem fio, de dados, baseada em torno do padrão IEEE 802.16 e capaz de fornecer comunicações de dados de alta velocidade (70 Mbps) sobre uma ampla área. Trata-se de uma tecnologia para o ponto de rede sem fio multiponto que está sendo implantada em uma variedade de aplicações para fornecer "a última milha" de comunicações aos usuários a as redes de comunicação *backbone*, as quais são exigidas em muitos países em desenvolvimento.

Para os tipos de teste de WiMAX com muitos fabricantes que estão desenvolvendo no momento atual e fornecendo o equipamento, é essencial que operem suas especificações individuais e que igualmente interoperem entre si. Para garantir que isso aconteça, os fabricantes precisam executar diferentes tipos de teste, como verificação de testes de desenvolvimento e validação, testes de conformidade e teste de produção, pois cada um tem seu lugar no desenvolvimento de qualquer produto.

O equipamento de teste é necessário para garantir que todos os circuitos funcionem como deveriam. Para tal, são exigidos artigos como osciloscópios e também o equipamento de medição do RF, o qual inclui analisadores do espectro, medidores de potência do RF e semelhantes. Também será necessário ajudar a depuração do *software*, o que provavelmente inclui emuladores de vários tipos.

Durante a fase de testes de desenvolvimento, é sempre aconselhável realizar testes do produto contra os testes de conformidade, uma vez que estes terão de ser empreendidos mais tarde. Usando o equipamento e os casos de teste de conformidade, o produto pode ser feito para funcionar corretamente, e quaisquer *bugs* podem ser removidos nessa fase. Frequentemente, o equipamento de teste de conformidade permitirá que os casos de teste sejam modificados para que os testes do desenvolvimento sejam empreendidos.

### 6.6 O teste de verificação e validação

Uma vez que o projeto do produto foi concluído – nesse caso, uma unidade WiMAX –, será necessário garantir que os requisitos estabelecidos na especificação de desenvolvimento atendam às suas necessidades e também que o produto opere satisfatoriamente. Os equipamentos de teste incluem qualquer equipamento necessário para testar as interfaces para a unidade global. Normalmente, o equipamento de teste irá incluir itens de analisadores de espectro e medidores de energia para verificar o desempenho RF para analisadores de comunicação de dados com o intuito de checar as interfaces de dados.

Para garantir que alguns desses testes sejam realizados com mais facilidade, levando-se em conta que a operação global de WiMAX envolve muitos protocolos complicados, podem ser usados testadores especializados WiMAX ou equipamento de teste WiMAX. Esses artigos são fornecidos por um número de fabricantes de equipamento de teste e foram desenvolvidos especificamente para o teste de WiMAX.

A conformidade de teste, uma das principais preocupações para qualquer organização, como o Fórum WiMAX, é a de garantir que os dispositivos de uma variedade de diferentes fabricantes operem satisfatoriamente juntos. Com o tamanho das especificações para padrões tais como o WiMAX, que aumenta junto com sua complexidade, há a possibilidade de as áreas interpretadas em maneiras diferentes ou de os erros atuais impedirem sua interoperabilidade. Além disso, o padrão 802.16 só especifica as camadas físicas e Mac do padrão, e isso deixa muitos aspectos abertos para os vendedores individuais. O Fórum WiMAX procura abordar essa questão e garantir que as questões de interoperabilidade não surjam. Um grande número de problemas nessa área levaria a uma falta de confiança na tecnologia como um todo e diminuiria significativamente as vendas para todos os vendedores.

Para garantir que os problemas de interoperabilidade não ocorram, os produtos devem ser executados contra um conjunto validado de casos de teste de conformidade em um conjunto de equipamentos de teste de conformidade que foi validado pelo Fórum WiMAX. Os produtos que passam por conformidade e testes de interoperabilidade são considerados WiMAX Forum Certified e podem exibir essa marca em seus produtos e em seus materiais de *marketing*. Alguns vendedores podem afirmar que seu equipamento é WiMAX Ready, WiMAX Compliant ou pre-WiMAX caso não sejam oficialmente WiMAX Forum Certified. Estes produtos podem não ter sido totalmente testados e, conseqüentemente, podem ter problemas de interoperabilidade.

Existem dois tipos de equipamentos de teste de conformidade WiMAX:

- BSE (*base station emulator*): usado para testar uma MS (estação móvel).
- MSE (emulador de estação móvel): usado para testar uma BS (estação base).

Há também outras distinções entre os testadores. Há aqueles que dirigem o sinal de rádio em si e aqueles que se dirigem aos protocolos. Os testes de rádio normalmente levam mais tempo para serem executados, pois eles procuram o desempenho do sinal de rádio, endereçando parâmetros como o espectro do sinal, os níveis de potência e semelhantes. Os testes de protocolo abordam a maneira pela qual o equipamento WiMAX se comunica com outras unidades, enviando as mensagens e estabelecendo um *link*.

Embora o equipamento de teste de conformidade seja capaz de executar os testes de conformidade para equipamentos WiMAX, em vista das diferentes bandas que estão em uso, o equipamento de teste de conformidade pode precisar de opções diferentes para capacitá-lo a cobrir as bandas relevantes.

Uma importante área é o desenvolvimento dos casos de teste que são utilizados para o processo de certificação. O modelo segue um processo semelhante ao usado para casos de teste para UMTS. Os procedimentos básicos de teste são escritos pelo Fórum WiMAX e descrevem a funcionalidade a ser testada e o método de teste. Eles também fornecem uma prioridade para eles, ETSI, e, em seguida, tomam os procedimentos de teste e escrevem o código em TTCN-3. Esse código é liberado para os fornecedores de equipamentos de teste que analisam, integram e, se necessário, levantam "solicitações de alterações". Uma vez que os casos de teste estejam passando no equipamento real, podem ser submetidos à validação. Somente então o equipamento do fornecedor pode ser testado para a certificação em um laboratório

de teste credenciado do fórum de WiMAX. Os casos novos de teste são desenvolvidos frequentemente conforme as tecnologias evoluem, e os mais velhos podem mudar.

### 6.7 Teste de produção WiMAX

Uma vez que um item está em produção, o teste precisa ser executado para verificar se a unidade foi construída corretamente. Como esse teste não acrescenta nenhum valor, mas apenas garante que as coisas estão corretas, ele precisa ser realizado do modo mais rápido possível, garantindo que nenhum produto defeituoso deixe a fábrica. Consequentemente, essa forma de testes WiMAX não deve incluir qualquer desenvolvimento, verificação, validação ou teste de conformidade. Em vez disso, deve se concentrar nos testes necessários para garantir que o produto foi montado corretamente.

O tipo de equipamento de teste utilizado para testes de produção é bastante diferente do necessário para testes de conformidade. Os testes precisam ser executados muito rapidamente e, portanto, o equipamento de teste é ajustado para garantir que ele possa realizar um número limitado de testes muito rapidamente.

O teste de WiMAX é um elemento essencial da implantação de WiMAX. Os produtos WiMAX precisam ser corretamente projetados, verificados e validados e, em seguida, deve-se realizar o teste de conformidade. Uma vez na produção, eles precisam se submeter ao nível correto de testes de produção. Embora esse teste seja caro, é um elemento essencial do desenvolvimento e do processo de produção.

### 6.8 Comparando WiMAX FDD e TDD modo duplex

O WiMAX está sendo atualmente implantado em muitas áreas do planeta e para uma variedade de aplicações. Com essas implantações de WiMAX que estão sendo destinadas a diferentes mercados com aplicações diferentes, os dois tipos de esquema duplex disponíveis no WiMAX (TDD e FDD) precisam ser considerados para garantir que a opção correta seja feita. Consequentemente, é necessário realizar uma comparação WiMAX TDD e FDD e avaliar qual opção é melhor para cada aplicação dentro das limitações regulatórias. Outras opções de WiMAX, incluindo variantes fixos e móveis que estão disponíveis com WiMAX e oferecem um alto nível de serviço, considerado por muitos como uma tecnologia 4G celular, são boas opções para serem implantadas em muitas áreas do planeta.

Os modos duplex do WiMAX 802.16 Standard oferecem duas formas de transmissão duplex para separar as mensagens de *uplink* e *downlink*. Tanto o WiMAX TDD (*time division duplex*) e WiMAX FDD (*frequency division duplex*) estão disponíveis, e cada um oferece suas próprias vantagens e desvantagens.

Para que os sistemas de comunicação de rádio possam se comunicar em ambas as direções, é necessário ter o que é denominado esquema duplex. Um esquema duplex fornece uma maneira de organizar o transmissor e o receptor de modo que possam transmitir e receber. Existem vários métodos que podem ser adotados. Para aplicações, incluindo telecomunicações sem fios e celulares, em que é necessário que o transmissor e o receptor sejam capazes de operar simultaneamente, dois esquemas estão em uso. O FDD usa dois canais, um para transmitir e outro para receber; já o TDD usa uma frequência, mas aloca diferentes *slots* de tempo para transmissão e recepção.



### 6.9 Os requisitos para WiMAX duplex

É possível usar tanto FDD e TDD para WiMAX. No entanto, as transmissões FDD requerem o uso de dois canais, um para o *uplink* e um para o *downlink*, os quais devem ser separados suficientemente para permitir que o receptor opere sem ser afetado pelo transmissor que precisa funcionar simultaneamente. Isso não só exige que haja uma separação de frequências entre *uplink* e *downlink*, mas normalmente também necessita incorporar filtragem adicional para remover a frequência do transmissor da banda de recebimento, o que pode adicionar custo aos itens de consumo.

Qualquer espectro emparelhado alocado é normalmente dividido de modo que haja largura de banda igual disponível em ambas as direções. Isso não é ideal onde o tráfego pode ser assimétrico e o equilíbrio pode ser variável.

Usando o WiMAX TDD é possível acomodar a assimetria no saldo do tráfego. Ao alterar o número de quadros para o tráfego em cada direção, é possível fazer uso muito mais eficiente do espectro disponível. O saldo de quadros para cada direção e, portanto, a capacidade podem ser alterados dinamicamente, permitindo que o sistema passe a responder o tráfego real que viaja em cada direção. Portanto, o TDD pode lidar com o tráfego de banda larga simétrica e assimétrica e, portanto, tem maior eficiência espectral do que o FDD para essas aplicações.

Com ambos os tipos de WiMAX, o esquema duplex está disponível para uso. É necessário escolher a forma correta de esquema duplex para o tipo específico de implantação. Para alcançar a forma ideal, é necessário realizar uma comparação WiMAX TDD e FDD para verificar a versão ideal sujeita a quaisquer restrições regulatórias. É útil notar a primeira versão de suporte fixo WiMAX de ambos os modos de TDD e FDD duplex, embora o Mobile WiMAX inclua apenas o modo TDD.

### 6.10 A tecnologia da multiplexação

#### 6.10.1 Introdução à multiplexação

A multiplexação é uma técnica que permite o compartilhamento, seja ele físico ou lógico, de um meio físico de comunicação para duas ou mais conexões lógicas, de forma a permanecer a independência e a simultaneidade para cada ponto envolvido na conexão.

#### 6.10.2 Características da multiplexação

O meio físico de comunicação pode ser caracterizado por dois ou mais parâmetros: a banda passante  $B$  do meio físico, medida em Hertz, e a capacidade máxima  $C$  desse mesmo meio físico, que utiliza a unidade de medida em *bits* por segundo e está relacionada ao canal  $B$  pelo teorema de Shannon:

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$$

Em que  $S/N$  é a relação sinal/ruído (*signal/noise*) do meio.



O espaço de comunicação pode ser caracterizado por dois parâmetros;

- B, banda passante do meio, medida em Hz (frequência máxima que passa pelo meio).
- Tempo, relacionado com C, capacidade do meio, medido em *bit/s*.

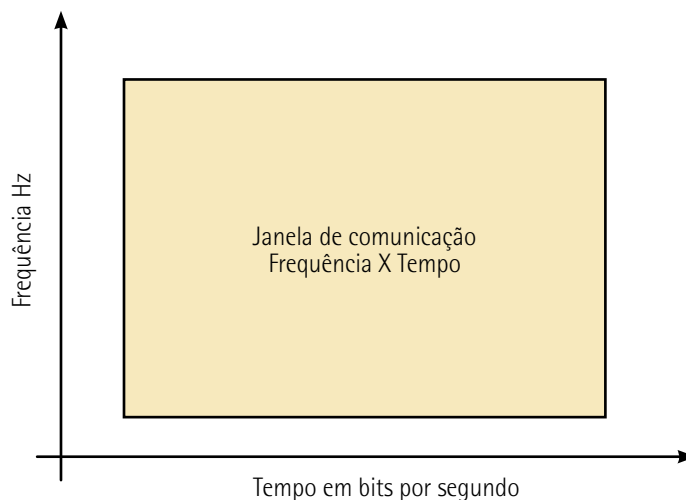


Figura 60 – Espaço de comunicação

Existem dois pontos de observação que caracterizam as duas maneiras de implementação da função da multiplexação:

- Multiplexação por divisão de frequência ou FDM (*frequency division multiplex*).
- Multiplexação por divisão de tempo ou TDM (*time division multiplex*).

### 6.10.3 Características da multiplexação FDM e TDM

Características da técnica de multiplexação FDM:

- É a técnica de multiplexação mais antiga.
- É própria para multiplexação de sinais analógicos.
- O canal lógico multiplexado é caracterizado por uma banda B associada que deve ser menor que a banda do meio.
- É pouco eficiente (exige muita banda de resguardo).
- Exige *hardware* (filtros) próprio para cada canal lógico.
- É cara e de difícil implementação.

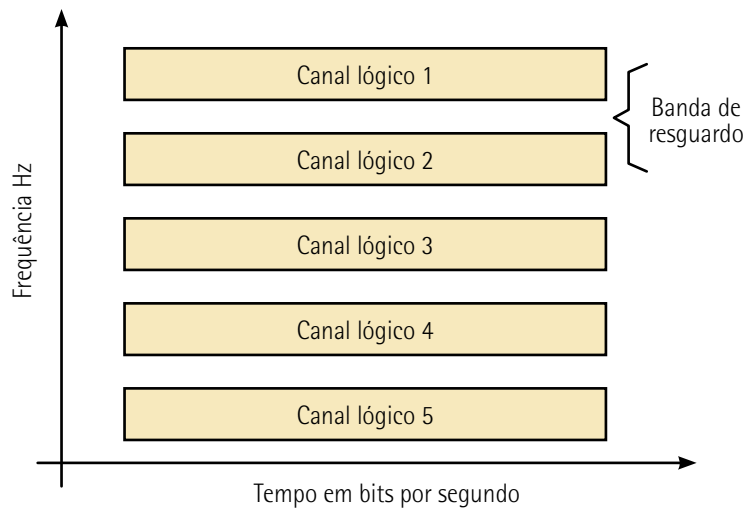


Figura 61 – Multiplexação por divisão de frequência

Características da técnica de multiplexação TDM:

- Técnica própria para multiplexação de sinais digitais.
- Os canais lógicos multiplexados são caracterizados por uma taxa medida em *bit/s*, cuja soma deve ser igual à taxa máxima do meio (canal agregado).
- É eficiente, exige pouco ou nenhum tempo de resguardo.
- Pode ser implementada por *software* ou *hardware*.
- É simples e de fácil implementação.

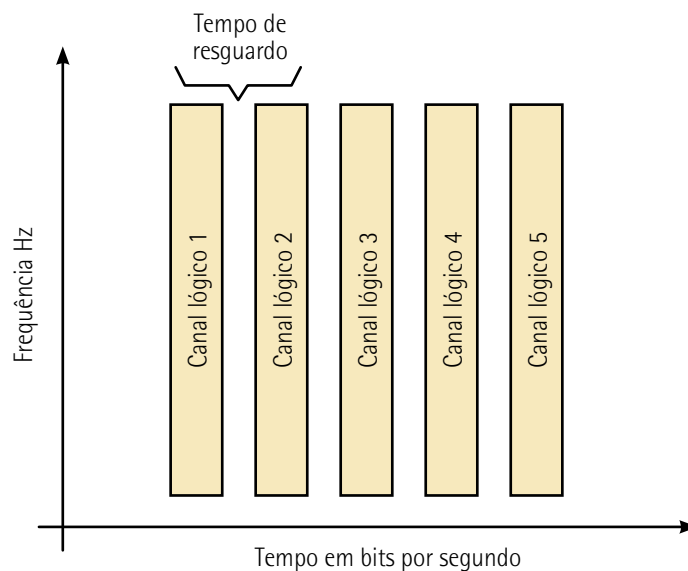


Figura 62 – Multiplexação por divisão de tempo

### 6.10.4 Canais lógicos e multiplexação

Através das técnicas de multiplexação, podemos definir logicamente um canal de comunicação. O canal lógico possui uma implementação física real no nível físico e não deve ser confundido com o conceito de circuito virtual ou canal virtual do nível de rede. O canal lógico é uma entidade física que possui uma caracterização através das técnicas de multiplexação tanto em FDM como TDM.

Podemos distinguir dois tipos de canais lógicos:

- Canais analógicos: associados à multiplexação analógica FDM, que são caracterizados através de uma determinada largura de banda  $B$ , medida em Hz. Por exemplo:
  - Canal de voz telefônico  $B = 4$  kHz nominal (útil 3,1 kHz).
  - Canal de rádio  $B = 10$  kHz (típico).
  - Canal de televisão  $B = 6$  MHz.
- Canais digitais: associados à multiplexação digital TDM, são caracterizados através de uma determinada taxa, medida em *bit/s*. Por exemplo:
  - Canal digital de voz Taxa: 64 kbit/s.
  - Canal E1 (MUX 1º nível) Taxa: 2,048 Mbit/s.
  - Canal E3 (MUX 3º nível) Taxa: 34 Mbit/s.
- O multiplexador realiza tanto as funções de multiplexação como demultiplexação. É duplex, portanto, obedece às relações indicadas.

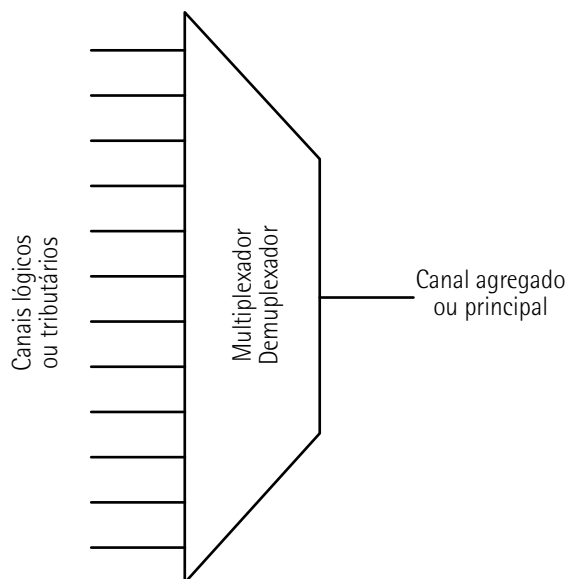


Figura 63 – Representação do multiplexador/demultiplexador

As seguintes relações devem ser obedecidas em multiplexadores:

$$\text{Sistema TDM} \Rightarrow T_A \geq \sum_{i=1}^n T_i$$

$$\text{Sistema FDM} \Rightarrow B_A \geq \sum_{i=1}^n B_i$$

## 6.10.5 Multiplexação FDM

A multiplexação por divisão de frequência foi desenhada para ser apropriada por sistemas analógicos, além de ser o primeiro sistema de multiplexação utilizado para a telefonia analógica de voz. Nesse sistema, a base é o chamado de canal de voz telefônico, cujas características serão descritas a seguir.

### 6.10.5.1 O canal de voz

O canal de voz possui uma largura de banda nominal de 4 kHz. Apesar de essa banda ser medida, apenas 3,1 kHz podem ser aproveitados. No primeiro nível da multiplexação por divisão de frequência, 12 canais de voz são multiplexados, formando um grupamento de canal. Cinco canais do grupo, por sua vez, são multiplexados em um canal de supergrupo, que contém 60 canais de voz.

Já no terceiro nível, cinco canais de supergrupo são multiplexados em um canal de grupo mestre, o qual por sua vez, carrega 300 canais de voz.

**Tabela 14 – Denominação dos canais agregados**

Nível de multiplexação	Denominação do canal agregado	Frequências limite do canal em KHz	Banda do canal em KHz	Número de canais de voz
0	Canal de Voz	0 4	4	1
1	Canal de Grupo	60 108	48	12
2	Canal Supergrupo	312 552	240	60
3	Canal Grupomestre	812 2044	1232	300

## 6.10.6 Sistema multiplex FDM de telefonia: submultiplexação do canal de voz

O canal de voz também pode ser submultiplexado em canais de telex ou telegrafia com bandas menores.

Existem ainda duas técnicas especiais de multiplexação FDM conhecidas por:

- WDM (*wavelength division multiplex*): técnica utilizada principalmente em comunicações ópticas, em que os canais lógicos são caracterizados por um dado comprimento de onda da luz.
- ECM (*echo cancelling multiplex*): técnica largamente empregada atualmente na implementação dos dois canais de um sistema duplex operando em uma linha de acesso de assinante telefônico. Neste caso, o sinal é transmitido na mesma banda pelas duas pontas do enlace e em cada um é filtrado fora o sinal de transmissão (eco), para obter o sinal de recepção.



### Observação

A multiplexação de divisão de tempo foi desenvolvida pela primeira vez para aplicações em telegrafia, para rotear várias transmissões simultaneamente em uma única linha de transmissão. Em 1870, Émile Baudot desenvolveu um sistema de multiplexação temporal de várias máquinas de telégrafo Hughes.

## 6.10.7 Multiplexação TDM

Ao utilizar a multiplexação por divisão de tempo, amostras são ciclicamente coletadas dos diversos canais tributários. Cada amostragem é colhida por uma específica fatia de sinal ou fatia de tempo e utilizada na montagem de um quadro agregado correspondente às amostragens de todos os tributários durante um ciclo de amostragem.

Características da multiplexação TDM:

- O sistema é totalmente síncrono e as taxas, tanto dos canais tributários como do canal agregado, são constantes e fixas.

- Num sistema TDM, a soma das taxas dos tributários deve ser igual à taxa do canal agregado.

$$T_a = \sum_i T_{t_i}$$

- Sistemas TDM são implementados em *hardware*, através de equipamento específicos.
- O TDM é largamente utilizado no suporte telefônico, em que a base são os canais digitais de voz de taxa fixa.

### 6.10.7.1 Multiplexador TDM de canais de voz digitais

Cada canal é amostrado 8000 vezes/s, gerando cada vez uma fatia de tempo constituída de 8 *bits* (8000/s x 8 *bit* = 64 kbit/s).

No canal de voz digital: fatias de tempo de 8 *bits* (octeto) são repetidas de 125 em 125  $\mu$ s.

$$\text{Taxa} = \frac{8}{125 \cdot 10^{-6}} = 64 \text{ kbit/s}$$

Logo, 32 fatias de tempo (*slot times*) são agregadas em um quadro constituído de 32 x 8 *bits* = 256 *bits*, com duração de 125 s (1/8000), o que corresponde a uma taxa de agregado  $T_a = 256/125 \cdot 10^{-6}$  2,048 Mbit/s.

A comutação de fatias de tempo dentro do quadro caracteriza a comutação entre os canais digitais segundo uma matriz de comutação do tipo 32 x 32.



#### Observação

O sinal de voz do telefone chega na central telefônica na forma de sinal analógico. Através do CAD/CDA (conversor analógico digital e conversor digital analógico), é transformado em um sinal digital de 64 kbit/s.

### 6.10.8 Multiplexadores assíncronos de tempo: ATDM (*asynchronous time division multiplex*)

A técnica de multiplexação por divisão de tempo assíncrono, também conhecida por multiplexação estatística, faz o uso do processo de multiplexação colhendo nas portas dos tributários os pacotes dos dados de acordo com sua demanda ou taxa.

As portas inativas não ocupam espaço no quadro agregado, portanto, não são coletadas.

Características:

- É satisfeita a seguinte relação entre as taxas dos  $n$  tributários ( $T_i$ ) e a taxa do agregado ( $T_a$ ):

$$T_a < \sum_{i=1}^n T_{t_i} \text{ ou seja } \frac{\sum_{i=1}^n T_{t_i}}{T_a} > 1 \text{ (ganho estatístico do multiplexador estatístico).}$$

- As portas tributárias devem ter *buffers* adequados para atender picos de demanda dos canais para que não haja perda de pacotes.
- É atualmente a tecnologia mais avançada na otimização dos meios de comunicação.
- Aplicações típicas: *switch* ATM, roteadores de pacotes tipo IP, X-25 ou *frame relay*.

### 6.11 As tecnologias PDH e SDH

#### 6.11.1 A multiplexação do tempo e o PDH (hierarquia digital plessiocrona)

A implementação de uma nova metodologia para o transporte de dados utilizando a multiplexação nos faz entender que, internamente aos tipos de redes digitais e aos serviços integrados de faixa larga, existe uma dificuldade de implementação para a técnica de comutação que deverá ser utilizada. Como os novos serviços de redes digitais de serviços integrados de faixa larga possuem diversas variedades e características relacionados às taxas de transmissão, sobretudo através do desenvolvimento das técnicas de comutação por circuitos, essa tecnologia é capaz de suportar os requisitos RDSI-FL.

Uma tecnologia de comutação rápida dos pacotes é mais adequada às novas características das redes digitais e serviços integrados de faixa larga, porém os maiores problemas enfrentados por essa nova tecnologia é a diferenciação das hierarquias dos serviços de telefonia, sobretudo os três grandes blocos industriais (japonês, americano e europeu), o que dificulta sistematicamente a implementação e a interligação de suas redes telefônicas.

A digitalização dos sistemas de telefonia utiliza o método PCM (modulação codificada por pulsos), que basicamente é uma forma de amostragem do sinal de voz limitada a 4 kHz a uma taxa de 8 kHz, conhecida por taxa de Nyquist, e ainda representa a amplitude dessas amostragens por 8 *bits*.

Dessa forma, é gerada uma taxa de  $8000 \times 8 = 64$  Kbps, a fim de aproveitar essa taxa de transmissão que suplanta as capacidades acima de 64 Kbps, e empregada a técnica de multiplexação por divisão de tempo TDM, em que diversos sinais podem ser transportados através de um único meio físico, simultaneamente, intercalando-se os *bytes* ou octetos de cada sinal durante o intervalo de transmissão.

Por exemplo, pode-se observar a hierarquia de telefonia europeia, em que as sessões multiplexadas representam resultado de um agrupamento de trinta canais de voz de 64 Kbps e ainda reservam dois canais para controle, ocupando efetivamente um único canal de 2048 Kbps. Ao longo do tempo, uma grande demanda por telefonia se iniciou, e novos protocolos e níveis de multiplexação foram implementados, formando uma imensa hierarquia de multiplexação/transmissão (STALLINGS, 1992).



Observamos que as diferenças entre as hierarquias de telefonia americana, europeia e japonesa indicam suas taxas de transmissão a um determinado número de canais que podem ser agregados. A taxa de transmissão relacionada ao nível imediatamente superior não é especificamente obtida, e isso acontece devido à inclusão dos canais de controle, aos *bits* reajuste e aos de sincronização.

Certamente, o maior inconveniente do sistema de multiplexação por divisão de tempo (TDM) é o fato de os sinais serem provenientes de fontes origem diferentes, acometendo a uma diferença de sincronismo entre eles. Isso caracteriza o impedimento da multiplexação direta dos tributários originais que carregam a sinalização dos usuários e ainda denota a necessidade da inclusão dos *bits* de ajuste pelo multiplexador para a compatibilização ênfase junto à taxa de transmissão dos canais de voz. Sabendo da diferença de frequência de amostragem, surge a terminologia PDH (hierarquia digital plesiócrona).

Aparentemente, existe uma série de desvantagens que limitam a utilização do PDH como tecnologia de transmissão. Um exemplo se refere à dificuldade de inserção e extração dos canais tributários, justamente para inserir ou extrair os dados tributários a partir de um sistema PDH. Torna-se necessária uma operação de multiplexação e demultiplexação, a qual transforma todo esse conceito em uma técnica pouco flexível, com baixa capacidade de gerenciamento da rede (apenas 0,5%).

Na atualidade, devido a uma grande necessidade por capacidade e flexibilidade da rede sobretudo pelo ingresso de novos serviços, temos uma alternância no enfoque dos sistemas de telecomunicações. Assimilou-se então uma filosofia baseada na eficiência, em que avaliação do sistema era dado em função de sua capacidade do transporte das informações efetivas. Voltamos para uma filosofia de gerenciamento em que a parte da capacidade de transmissão do sistema é utilizada para as transmissões de informações e de gerência do sistema. Assim, em razão da eficiência da rede, esta estará sequelada, para obter-se uma maior confiança e segurança do sistema. Elementos como a falta de padronização ou pouquíssima padronização dos sistemas utilizados em PDH fazem com que as interconexões do sistema se tornem onerosas e ineficientes.

Avaliando todas essas questões, buscou-se a criação de um sistema que oferecesse mais flexibilidade e que fosse compatível com sistemas já existentes. Em seu lugar surgiu o SDH (hierarquia digital síncrona), associado aos esforços do comitê ITU-T a fim de criar uma nova hierarquia de transmissão. Os diversos blocos industriais formaram então um comitê baseado nos Estados Unidos e conhecido como Bellcore (Bell Communication Research). Pouco tempo depois, surgiu a nova padronização no formato SDH. Foram criadas também novas taxas de padronização para as interfaces rede a rede, equivalentes a 155,52 Mbps, e mantidos todos os níveis de compatibilidade com a rede Sonet.

### 6.11.2 Multiplexação sob o SDH

O padrão SDH possui como principais características:

- Padronização a interconexão de equipamentos óticos de diversos fornecedores.
- Arquitetura flexível, capaz de se adaptar a futuras aplicações (como RDSI-FL) com taxas variáveis.

- Padronização da multiplexagem utilizando uma taxa de 51,84 Mbps.
- Padronização das funções de extensão, operação e manutenção (OAM – *operation and maintenance*).
- Simplificação da interface com comutadores e multiplexadores devido à sua estrutura síncrona.

O SDH possui capacidade de transmitir:

- 2/34/140 Mbps.
- DS1/DS2/DS3 (EUA).
- FDDI.
- ATM.
- DQDB.

Foi definida uma hierarquia de taxas padronizadas para o SDH.

Denominação direta:

**Tabela 15 – Denominação dos quadros SDH**

Sonet SDH	Taxa (Mbps)
STS-1/OC-1	51,84
STS-3/OC-3 STM-1	155,52
STS-4/OC-4 STM-3	466,56
STS-4/OC-4 STM-3	622,08
STS-18/OC-18 STM-6	933,12
STS-24/OC-24 STM-8	1244,16
STS-36/OC-36 STM-12	1866,24
STS-36/OC-36 STM-12	2488,32

Legenda da tabela:

STS = *synchronous transport signal level*

OC = *optical carrier level*

STM = *synchronous transfer mode level*

### 6.11.3 Estrutura de um quadro SDH

O quadro básico SDH é o quadro STM-1. Ele possui 2430 bytes transmitidos a cada 125 us, resultando em uma taxa de 155,52 Mbps (2430 bytes/quadro x 8 *bits*/quadro x 8000 quadros/seg. = 155,52 Mbps). Assim, logicamente, o quadro pode ser considerado uma matriz de 9 filas de 270 bytes cada, sendo que uma fila é transmitida por vez.

Como já vimos anteriormente, em um sistema telefônico convencional, para se incluir ou retirar um tributário, há todo um processo de demultiplexação. Então, o SDH faz uso de apontadores para acessar, remover e inserir informações em um canal. Esses ponteiros estão contidos no cabeçalho do quadro (embora não façam parte dele) e possuem referências à estrutura de multiplexação dos canais nesse quadro.

A seguir podemos ver a representação da estrutura de um quadro STM-1. O VC (*virtual container*) é utilizado para o transporte dos tributários e transmitido fim a fim na rede, sendo montado e desmontado apenas uma vez. Ele é formado pelo *container* (C-4) e pelo *path overhead*. O *container* (C-4) possui uma capacidade de 149,76 Mbps (para o caso do transporte de um tributário de 140 Mbps) e pode conter também *path overhead* de mais baixa ordem (caso transmita outros tipos de tributários diferentes). O *path overhead* (de alta ordem) provê serviços de monitoração de alarme e monitoração de performance. O *section overhead* é um cabeçalho que provê facilidades para suportar e manter o transporte de um VC na rede e que pode sofrer alterações ao longo do percurso.

Os mapeamentos SDH são baseados em ponteiros. Um ponteiro com informações sobre a diferença de fase entre um VC e o STM-1 ou entre o início de um VC e o VC de ordem superior é incluído em cada VC. O ajuste também é realizado por meio de ponteiros.

### 6.11.4 Arquitetura SDH

A arquitetura SDH é singular e composta de uma hierarquia de quatro níveis:

- Camada fotônica: nível físico, inclui especificações sobre o tipo da fibra ótica utilizada, detalhes sobre a potência mínima necessária, características de dispersão dos *lasers* transmissores e a sensibilidade necessária dos receptores. É responsável, ainda, pela conversão eletro-ótica dos sinais.
- Camada de seção: responsável pela criação dos quadros SDH, embaralhamento e controle de erro. É processada por todos equipamentos, inclusive os regeneradores.

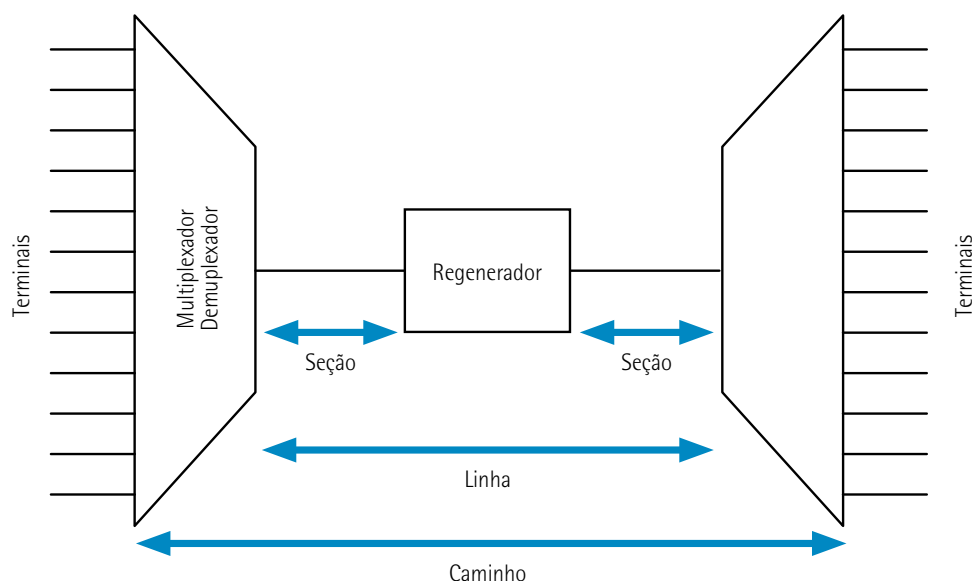


Figura 64 – Rede SDH, relação de suas camadas com os ativos de rede

- Camada de linha: cuida da sincronização, multiplexação dos quadros e comutação. É responsável, ainda, pela delimitação de estruturas internas ao envelope de carga. Seu processamento ocorre em todos os equipamentos, exceto os regeneradores.
- Camada de caminho: responsável pelo transporte de dados fim a fim e da sinalização apropriada. É processada apenas nos terminais.

A figura apresentada faz a demonstração das camadas fisicamente. Uma sessão representa, como no SNA, um *link* estabelecido entre dois receptores/transmissores (porém aqui esses *links* são óticos). Para distâncias pequenas, a fibra pode ser ligada diretamente entre usuários, mas se a distância for maior, há a necessidade da utilização de regeneradores. Uma linha é composta de uma ou mais sessões (de modo que a estrutura do canal permanece a mesma), e o *path* (caminho) é o circuito completo, fim a fim.

### 6.11.5 Técnicas de comutação

Observando a mecânica da arquitetura SDH, podemos notar algumas técnicas de comutação necessárias para o transporte de dados através de uma rede, suas características e ainda a escolha ideal para as redes ATM, como a técnica mais indicada para a rede digital de serviços integrados de faixa larga. A seguir, estabelecemos a representação das diversas técnicas de comutação e na forma do espectro sendo limitadas a seus extremos pelas técnicas mais comuns de comutação de circuitos.

#### 6.11.5.1 Comutação de circuitos (*circuit switching*)

A técnica de comutação por circuitos consiste na existência de um caminho dedicado para comunicação de dados entre as duas partes, especificamente como a taxa de transmissão fixa. Esse tipo de comunicação através da comutação por circuitos envolve três etapas distintas: a primeira é o estabelecimento da conexão, a segunda é a transferência dos dados e a terceira é a desconexão do circuito.

Existe ainda a locação de um canal que permanece dedicado a essa conexão até que sua desconexão seja executada, certamente, pelo próprio usuário através da sinalização de controle.

Nos casos em que existe um tipo de tráfego variável, esse canal pode estar sendo subutilizado, o que nos dá a impressão de o tráfego estar sendo executado em formato de rajadas, porém existe um melhor rendimento na utilização de uma técnica de comutação por redes de pacotes. Essa técnica é muito utilizada para transmissão de voz na telefonia tradicional e para a rede digital de serviços integrados de faixa estreita, que possui algumas características necessárias para a taxa de transmissão constante.

#### 6.11.5.2 Comutação de circuitos multitaxa (*multirate circuit switching*)

A técnica de comutação de circuitos multitaxa é vista como uma melhora da comutação por circuitos. Ela visa sistematicamente eliminar o desperdício da capacidade do canal que foi alocado, o que acontece porque a conexão é feita através de diversos circuitos de forma simultânea. Apesar de essa técnica apresentar uma boa e significativa melhora em termos de flexibilidade, ela pode suportar

serviços de taxas distintas e diversas. Observando esses detalhes, essa não é uma opção de tráfego adequada para a sistemática das rajadas.

### 6.11.5.3 Comutação de pacotes (*packet switching*)

Sabemos que a técnica de comutação por circuitos apresenta um nível elevado relacionado ao rendimento de quando são empregadas para transmissão da voz, simplesmente pelo fato de que o canal está ocupado quase o tempo todo, a todo tempo de conexão. Entretanto, com o aumento da utilização da rede de telefonia para transmissão dos dados, uma convergência dos sistemas é significativa, e alguns problemas, por exemplo, a caracterização das variações de taxa de transmissão dos dados e o dimensionamento das linhas de transmissão com base na taxa de pico, provocam uma subtração da rede quando a taxa for menor.

Esses tipos de problemas podem ser evitados pelas técnicas de comutação por pacotes. Observando essa técnica, os quadros de informações são transmitidos por rotas definidas no canal, não havendo nenhuma necessidade de estabelecer um caminho delicado entre as partes emissor e receptor. Existe um aproveitamento distinto das linhas de comunicação, em que os canais podem ser compartilhados por várias mensagens ao longo do seu período de tempo, caráter distinto das mensagens que são transmitidas por demanda.

Um dos problemas apontados por essa técnica é o cabeçalho dos pacotes serem excessivamente grandes, o que dificulta sua aplicação onde existam altas taxas de transmissão. A depender da forma como cada pacote é transmitido e armazenado, ele pode chegar ao seu destino apenas quando o canal não está ocupado. Observando o alto volume de tráfego na rede, é substancialmente importante avaliar os altos retardos de tempo entre os pacotes dentro desse sistema. Sobretudo, não há um comportamento desejável para aplicações em missão crítica, como mensagem de voz que exigem uma taxa constante e fluída entre os elos de transmissão.



#### **Lembrete**

A fim de transportar vários fluxos de dados de um lugar para outro sobre um meio de transmissão comum, eles são multiplexados em grupos de quatro. Como cada um dos quatro fluxos de dados não é, necessariamente, executado na mesma taxa, alguma compensação deve ser introduzida. Normalmente, o multiplexador leva os dados dos quatro fluxos de dados na taxa de 2,48 Mbit/s de entrada e alimenta cada um dos quatro fluxos em um fluxo de 2,112 Mbit/s, através de um armazenamento de *buffer*, deixando uma série de lacunas fixas em cada quadro.

### 6.11.5.4 *Frame relay*

A técnica de comutação do *frame relay* é a que tira o melhor proveito da qualidade dos meios de transmissão da atualidade. Uma vez que as conexões e as transmissões se tornam cada vez mais confiáveis, o *frame relay* elimina grande parte do cabeçalho que a técnica de comutação por pacotes

exige. Ele consegue atingir taxas de transmissão superiores a 2 Mbps, enquanto a comutação por pacotes fica limitada a 64 Kbps.

### 6.11.5.5 *Cell relay*

A técnica de comutação *cell relay* é considerada por muitos a própria ATM. Proveniente de uma combinação das características da comutação por circuitos e da comutação por pacotes, envolve uma mistura equilibrada de todo desenvolvimento atingido por essas duas tecnologias, utilizando o melhor de cada. Comparado ao *frame relay*, o *cell relay* mantém as mesmas características da não existência do controle nó a nó. Porém, a principal diferença é a utilização de células de tamanho fixo, que dão lugar aos datagramas de tamanho variável, certamente um dos motivos de possuírem um melhor desempenho na aplicação de velocidades comparados a datagramas de tamanho variável. Essa tecnologia pode operar com taxas na ordem de centenas de *megabits*, enquanto o *frame relay* fica limitado a 4 megabits por segundo.

Muito além dos vários canais lógicos que são multiplexados sobre o único meio físico, uma das principais características do ATM é a aplicação dos canais e dos caminhos virtuais. Ele ainda pode ser comparado a uma técnica de comutação de circuitos multitaxas; entretanto, sua aplicação prevê que os canais virtuais possuem suas taxas moduladas, dinamicamente definidas no momento da conexão, diferentemente dos canais de taxa fixa.

Outra informação importante que deve ser considerada é, justamente, o tamanho das células, que no caso do ATM permanecem fixas ao tamanho de 53 *bytes*. Certamente, essa condição vem de uma relação de concordância e eficiência da transmissão, relacionada diretamente à complexidade da rede e às taxas de atraso. Depois de muita deliberação, o comitê ITU-T, resolveu padronizar o valor da célula a 48 *bytes* como área de dados e 5 *bytes* destinados a cabeçalho.



### **Resumo**

Para chegarmos às redes de alto desempenho, é necessário entender os caminhos por onde a informação trafega. A multiplexação é o caminho natural para o aproveitamento máximo de meios de comunicação – por exemplo, as fibras óticas e os *links* de rádio digital e de satélite disponíveis no mercado.

O primeiro grande experimento de comunicação de longa distância envolvendo centrais de comunicação telefônica desenvolvido surgiu com a implementação das hierarquias digitais plesiócronicas. Essa tecnologia, para muitos autores, nasceu fadada ao fracasso, mas tem seus méritos, já que foi capaz de encurtar as distâncias da voz e introduzir uma tecnologia de comunicação digital com níveis e aceitabilidade e de permanência.

O predecessor imediato de tecnologia da hierarquia digital plesiócrona

não demorou a chegar. Ele veio formatado por um padrão internacional que consagrou a digitalização da voz pelo planeta. Fez mais do que isso: criou um novo padrão de voz digital que perdura até os dias de hoje e é também a base operacional para as novas tecnologias de alto desempenho que surgiram em função das suas mecânicas de comutação. O ATM é a principal delas e trouxe altas velocidades de comunicação, unindo ainda mais as pessoas e as corporações pelo planeta.



### Exercícios

**Questão 1.** (IF-SP, 2011) Num ambiente ethernet cabeado, qual é o protocolo usado pelas estações de trabalho para controlar o acesso ao meio físico?

- A) CSMA/CA.
- B) *Token ring*.
- C) FDDI.
- D) CSMA/CD.
- E) LLC (*logical link control*).

Resposta correta: alternativa D

#### Análise das alternativas

A) Alternativa incorreta.

Justificativa: o CSMA/CA é um protocolo usado para controlar redes Wi-Fi.

B) Alternativa incorreta.

Justificativa: o *token ring* é um protocolo usado em topologias em anel.

C) Alternativa incorreta.

Justificativa: o FDDI é uma topologia em anel duplo que faz uso de cabos de fibra óptica.

D) Alternativa correta.

Justificativa: o CSMA/CD é um protocolo usado para controlar redes ethernet.



