

Controle de enlace de dados e multiplexação

- 17.1 Fluxo de Controle e controle de erros
- 17.2 Controle de enlace de dados de alto nível
- 17.3 Motivação para multiplexação
- 17.4 Multiplexação por divisão de frequência
- 17.5 Multiplexação por divisão de tempo síncrona
- 17.6 Resumo
- 17.7 Leitura e Web sites recomendados
- 17.8 Principais termos, perguntas para revisão e problemas

OBJETIVOS DO CAPÍTULO

Depois de ler este capítulo, você deverá ser capaz de

- Explicar a necessidade de um protocolo de controle de enlace de dados.
- Descrever a operação básica de um protocolo de controle de enlace de dados, como o amplamente usado HDLC.
- Explicar a necessidade da eficiência de transmissão e citar os dois principais métodos usados para obter eficiência.
- Analisar o uso da multiplexação por divisão de frequência na distribuição de vídeo e nas redes de voz.
- Comentar sobre o uso da multiplexação nos sistemas de portadora digital.
- Falar sobre o serviço T-1 e descrever sua importância e as aplicações que o estão utilizando.
- Explicar o padrão SONET e sua importância para as redes remotas.

Este capítulo examina dois importantes conceitos de comunicação de dados: o controle de enlace de dados e a multiplexação.

Um protocolo de controle de enlace de dados inclui técnicas para regular o fluxo de dados por meio de um enlace de comunicação e para compensar os erros de transmissão. Em primeiro lugar, examinaremos os conceitos do controle de fluxo e do controle de erros e, depois, ilustraremos seu uso no protocolo de controle de enlace de dados HDLC. Esse protocolo é um dos mais usados e ilustra as técnicas usadas nesses protocolos.

Uma importante fonte de gastos em qualquer ambiente distribuído ou em rede é o custo de transmissão. Devido à natureza crítica da transmissão nesses ambientes e ao seu custo potencialmente alto, é importante maximizar a quantidade de informações que podem ser transmitidas através de determinado recurso ou, alternativamente, minimizar a capacidade de transmissão necessária para satisfazer determinado requisito de comunicação de informações corporativas. A última parte deste capítulo examina o principal método para alcançar eficiência de transmissão: a multiplexação.

17.1 FLUXO DE CONTROLE E CONTROLE DE ERROS

Os padrões de interface física fornecem um meio pelo qual um fluxo de dados pode ser transmitido, quer de modo síncrono ou assíncrono, através de um meio de transmissão. Entretanto, essas interfaces não incluem todas as funções necessárias para comunicação de dados. Entre os itens mais importantes não incluídos estão o controle de fluxo e o controle de erros.

Para fornecer essas funções necessárias, utiliza-se um protocolo de controle de enlace de dados. Esses protocolos geralmente servem apenas para transmissão síncrona. O esquema básico é o seguinte. Os dados a serem transmitidos por uma aplicação são enviados para o módulo de enlace de dados, que organiza os dados em um conjunto de quadros. Cada quadro é suplementado com bits de controle de modo que os dois lados cooperem para distribuir os dados corretamente. Os bits de controle são acrescentados pelo emissor do quadro. Quando o quadro chega, o receptor examina os

bits de controle e, se os dados chegarem corretamente, retira os bits de controle; em seguida, entrega os dados puros para o ponto de destino pretendido dentro do sistema. A Figura 17.1 ilustra o processo.

Com o uso dos bits de controle, diversas funções podem ser realizadas, incluindo o controle de fluxo e o controle de erros. Nesta seção, introduzimos essas funções. A próxima seção analisa especificamente um protocolo de controle de enlace de dados, conhecido como High-Level Data Link Control (HDLC).

Controle de fluxo

Suponha que desejamos escrever um driver de impressora, para passar dados de um computador para uma impressora. Nós conectamos os dois com o cabo apropriado em uma porta na máquina host. A porta host é programável para corresponder ao dispositivo periférico. Neste caso, vamos supor que a impressora esteja configurada para caracteres IRA de 7 bits, paridade ímpar, um bit de fim e uma velocidade de dados de 9.600bps. Usamos esses parâmetros na porta host, escrevemos o programa e tentamos enviar uma página de texto para a impressora. O resultado é que, após as primeiras linhas de texto, faltarão diversos caracteres; na verdade, há mais caracteres faltando do que impressos.

Qual é o problema? Em primeiro lugar, vamos calcular a velocidade de transferência de caracteres. Temos 7 bits para o caractere, 1 para o bit de início, um para a paridade e 1 para o bit de fim, totalizando 10 bits por caractere. Como o computador está transmitindo em 9.600bps, a velocidade de transferência é de 960 caracteres por segundo. Verificando o manual da impressora, descobrimos que ela pode imprimir no máximo 80 caracteres por segundo. Isso significa que estamos enviando 12 vezes mais dados do que a impressora pode aceitar. Não é surpresa que se percam dados.

Pode parecer estranho que impressora seja equipada com uma velocidade de dados mais alta do que a capacidade de impressão, mas isso é comum. A impressora possui um pequeno buffer (talvez 200 caracteres) de modo que possa aceitar caracteres em uma rajada, im-

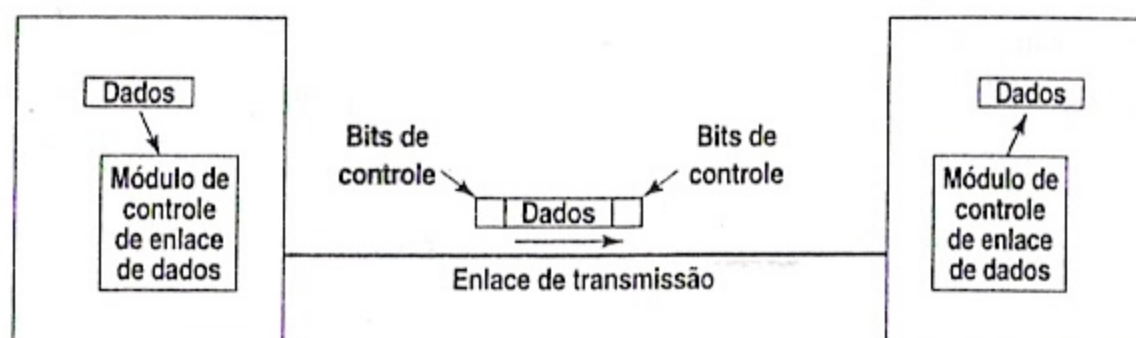


FIGURA 17.1 Funcionamento de um módulo de controle de enlace de dados.

primir esses caracteres e, depois, aceitar outra rajada. Assim, a impressora pode ser usada em uma linha compartilhada que esteja andando em uma velocidade suficientemente alta para servir diversas impressoras e terminais. Por exemplo, uma linha de 9.600bps poderia facilmente acomodar cinco ou dez impressoras desse tipo. Entretanto como a velocidade de dados é mais alta do que a velocidade de impressão, é possível que ocorra a condição de perda de dados descrita anteriormente.

O controle de fluxo é uma técnica para garantir que uma entidade transmissora não sobrecarregue uma entidade receptora com dados. No caso de um dispositivo eletromagnético, tal como uma impressora ou unidade de disco, um buffer fixo é fornecido, como descrito anteriormente. No caso de dados transmitidos para um computador, eles normalmente são destinados a alguma aplicação ou programa de sistema. O computador receptor aloca um buffer de dados de um determinado tamanho máximo para essa aplicação ou programa de sistema. Quando os dados são recebidos, o computador precisa realizar uma certa quantidade de processamento antes de passar os dados para o software de nível mais alto. Na ausência do controle de fluxo, o buffer do receptor pode encher e estourar, enquanto está processando dados antigos.

Para os protocolos de controle de enlace de dados, o controle de fluxo é realizado numerando-se cada quadro seqüencialmente (por exemplo, 0, 1, 2,...). Inicialmente, um buffer de um tamanho combinado é alocado no receptor. À medida que os quadros chegam e são processados, o receptor retorna um reconhecimento (ACK) para indicar quais quadros foram recebidos e implicitamente para informar quantos quadros mais podem ser enviados. Isso ficará mais claro quando abordarmos o HDLC mais adiante.

Controle de erros

No Capítulo 16, examinamos técnicas para um receptor detectar erros no processo de transmissão e recepção. Para corrigir esses erros, o controle de enlace de dados fornece mecanismos pelos quais os dois lados cooperam na retransmissão dos quadros afetados por erros na primeira tentativa. Esses mecanismos abrangem as técnicas de controle de fluxo tratadas anteriormente. Novamente, os dados são enviados como uma seqüência de quadros. Além disso, observamos dois tipos de erros:

- **Quadro perdido:** Um quadro não chega do outro lado. No caso de uma rede, esta pode simplesmente falhar ao entregar um quadro. No caso de um enlace

de dados ponto a ponto direto, uma rajada de ruído pode danificar um quadro a ponto de o receptor não saber que um quadro foi transmitido.

- **Quadro danificado:** Um quadro reconhecível chega, mas alguns dos bits estão errados (foram alterados durante a transmissão).

As técnicas mais comuns para o controle de erros baseiam-se em algum ou em todos os seguintes itens:

- **Deteção de erros:** O destino detecta quadros que estão em erro, usando as técnicas descritas no capítulo anterior, e descarta esses quadros.
- **Reconhecimento positivo:** O destino retorna um reconhecimento (ACK) positivo para quadros sem erros e recebidos com sucesso.
- **Retransmissão após timeout:** A origem retransmite um quadro que não foi reconhecido após um período predeterminado.
- **Reconhecimento negativo e retransmissão:** O destino retorna um reconhecimento negativo para quadros em que um erro é detectado. A origem retransmite esses quadros.

Coletivamente, todos esses mecanismos são chamados de **requisição de repetição automática (ARQ)**. O efeito da ARQ é tornar um enlace de dados potencialmente errôneo em um enlace de dados confiável. O mecanismo preciso da ARQ é descrito na próxima seção como parte de nossa análise do HDLC.

17.2 CONTROLE DE ENLACE DE DADOS DE ALTO NÍVEL

O protocolo de controle de enlace de dados mais importante é o HDLC. O HDLC é amplamente usado e é a base de muitos outros protocolos de controle de enlace de dados importantes, que usam os mesmos formatos ou semelhantes, e os mesmos mecanismos empregados no HDLC.

Estrutura de quadro do HDLC

Provavelmente, a melhor maneira de começar uma explicação do HDLC é analisar sua estrutura de quadro. A operação do HDLC envolve a troca de dois tipos de informação entre as duas estações conectadas. Em primeiro lugar, o HDLC aceita dados de usuário de alguma camada superior do software e entrega esses dados de usuário por meio do enlace para o outro lado. No outro lado, o HDLC aceita os dados de usuário e os entre-

ga para uma camada superior do software nesse lado. Em segundo lugar, os dois módulos HDLC trocam informações de controle para fornecer controle de fluxo, controle de erros e outras funções de controle. O método para se obter isso é formatar as informações que são trocadas em um **quadro**. Um quadro é uma estrutura predefinida que fornece um local específico para vários tipos de informação de controle e para dados de usuário.

A Figura 17.2 ilustra o formato do quadro HDLC. O quadro possui os seguintes campos:

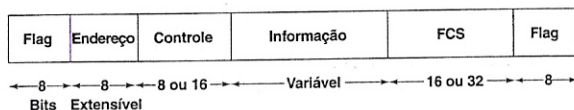
- **Flag:** Usado para sincronização. Aparece no início e no fim do quadro e sempre contém o padrão 01111110.
- **Endereço:** Indica a estação secundária para essa transmissão. É necessário no caso de uma linha multidrop, em que uma estação principal pode enviar dados para uma de várias secundárias, e uma de várias secundárias pode enviar dados para a principal. Esse campo normalmente possui 8 bits de tamanho, mas pode ser estendido (Figura 17.2b).
- **Controle:** Identifica a finalidade e as funções do quadro. É descrito mais adiante nesta subseção.
- **Informação:** Contém os dados de usuário a serem transmitidos.

- **Seqüência de verificação de quadro:** Contém uma verificação de redundância cíclica de 16 ou 32 bits.

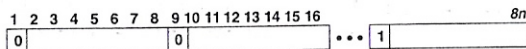
O HDLC define três tipos de quadros, cada qual com um formato diferente do campo Controle. Os quadros de informação (quadros I) transportam os dados de usuário a serem transmitidos para a estação. Além disso, os quadros de informação contêm informações para controle de fluxo e controle de erros. Os quadros de supervisão (quadros S) fornecem outro meio de exercer controle de fluxo e controle de erros. Os quadros não-numerados (quadros U) fornecem funções de controle de enlace suplementares.

O primeiro ou os dois primeiros bits do campo Controle servem para identificar o tipo de quadro. As outras posições de bit são organizadas em subcampos, como indicado nas Figuras 17.2c e 17.2d. Seu uso é explicado na análise do funcionamento do HDLC, a seguir. Observe que o campo Controle básico para quadros S e I usa números sequenciais de 3 bits. Com os comandos definindo-modos apropriados, pode-se usar um campo Controle estendido que empregue números sequenciais de 7 bits.

Todos os formatos de campo Controle contêm o bit poll/final (P/F). Seu uso depende do contexto. Em geral, nos quadros de comando, ele é chamado de bit P e é



(a) Formato de quadro



(b) Campo Endereço estendido

	1	2	3	4	5	6	7	8	
I: Informação	0	N(S)			P/F		N(R)		N(S) = Número de sequência da transmissão N(R) = Número de sequência da recepção
S: Supervisão	1	0	S		P/F	N(R)			S = Bits de função de supervisão M = Bits de função não numeradas
U: Não-numerado	11		M		P/F	M			P/F = Bit pol/final

(c) Formato do campo Controle de 8 bits

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Informação	0	N(S)							P/F		N(R)					
Supervisão	1	0		S		0	0	0	0	P/F	N(R)					

FIGURA 17.2 Estrutura de quadro do HDLC.

definido em 1 para solicitar um quadro de resposta da entidade HDLC parceira. Nos quadros de resposta, ele é chamado de bit F e é definido em 1 para indicar que é um quadro de resposta transmitido como resultado de um comando solicitante.

Operação do HDLC

A operação do HDLC consiste na troca de quadros I, quadros S e quadros U entre duas estações. Os vários comandos e respostas definidos para esses tipos de quadro estão relacionados na Tabela 17.1. Ao descre-

ver a operação do HDLC, examinaremos esses três tipos de quadro.

A operação do HDLC envolve três fases. Em primeiro lugar, um dos dois lados inicializa o enlace de dados de modo que os quadros possam ser trocados de maneira organizada. Durante essa fase, são combinadas as opções que devem ser usadas. Após a inicialização, os dois lados trocam dados de usuário e as informações de controle para exercer controle de fluxo e de erros. Finalmente, um dos dois lados sinaliza o término da operação.

Tabela 17.1 Comandos e respostas do HDLC

Nome	Comando/Resposta	Descrição
Informação (I)	C/R	Troca dados de usuário
Supervisão (S)		
Receber pronto (RR)	C/R	Reconhecimento positivo; pronto para receber quadro I
Receber não pronto (RNR)	C/R	Reconhecimento positivo; não pronto para receber
Rejeitar (REJ)	C/R	Reconhecimento negativo; voltar N
Rejeitar seletivo (SREJ)	C/R	Reconhecimento negativo; rejeição seletiva
Não-numerado (U)		
Definir modo de resposta normal/estendido (SNRM/SNME)	C	Define modo; estendido = números de sequência de 7 bits
Definir modo de resposta assíncrono/estendido (SARM/SARME)	C	Define modo; estendido = números de sequência de 7 bits
Definir modo balanceado assíncrono/estendido (SABM, SABME)	C	Define modo; estendido = números de sequência de 7 bits
Definir modo de inicialização (SIM)	C	Inicializa funções de controle de enlace na estação endereçada
Desconectar (DISC)	C	Termina conexão de enlace lógica
Reconhecimento não numerado (UA)	R	Reconhece aceitação de um dos comandos definir-modo
Modo desconectado (DM)	R	O respondedor está no modo desconectado
Requisitar desconexão (RD)	R	Requisita o comando DISC
Requisitar modo de inicialização (RIM)	R	Inicialização necessária; requisita o comando SIM
Informações não-numeradas (UI)	C/R	Usado para trocar informações de controle
Poll não-numerada (UP)	C	Usado para solicitar informações de controle
Reset (RSET)	C	Usado para recuperação; redefine N(R), N(S)
Trocar identificação (XID)	C/R	Usado para requisitar/informar estado
Teste (TEST)	C/R	Troca campos de informação idênticos para teste
Rejeição de quadro (FRMR)	R	Informa recebimento de quadro inaceitável

Inicialização Qualquer lado pode requisitar inicialização, emitindo um dos seis comandos definir-modo. Esse comando possui três finalidades:

1. Sinaliza o outro lado de que a inicialização é requisitada.
2. Especifica qual dos três modos é requisitado; esses modos têm a ver com o fato de se um lado age como uma estação principal e controla a troca, ou se os dois lados são parceiros e cooperam na troca.
3. Especifica se números seqüenciais de 3 ou 7 bits devem ser usados.

Se o outro lado aceita essa requisição, então, o módulo HDLC nesse lado transmite de volta um quadro UA – Unnumbered Acknowledgment para o lado iniciador. Se a requisição for rejeitada, então, um quadro Disconnected Mode (DM) é enviado.

Transferência de dados Quando a inicialização tiver sido requisitada e aceita, uma conexão lógica se estabelece. Os dois lados podem começar a enviar dados de usuário em quadros I, iniciando com o número seqüencial 0. Os campos N(S) e N(R) do quadro I são números seqüenciais que aceitam controle de fluxo e controle de erros. Um módulo HDLC que envia uma seqüência de quadros I irá numerá-los seqüencialmente, módulo 8 ou 128, dependendo de números seqüenciais de 3 ou 7 bits serem usados ou não, e colocar o número seqüencial em N(S). N(R) é o reconhecimento para quadros I recebidos; ele permite que o módulo HDLC indique o número do próximo quadro I que ele espera receber.

Os quadros S também servem para controle de fluxo e de erros. Utiliza-se o quadro Receber Pronto (RR) para reconhecer o último quadro I recebido que indica o próximo quadro I esperado. O RR é usado quando não existe tráfego de dados de usuário reversos (quadros I) para transportar um reconhecimento. Receber Não Pronto (RNR) reconhece um quadro I, como em RR, mas também pede que a entidade parceira suspenda a transmissão de quadros I. Quando a entidade que emitiu o RNR estiver novamente pronta, ela envia um RR. REJ inicia a ARQ volta-para-N. Ele indica que o último quadro I recebido foi rejeitado e que a retransmissão de todos os quadros I começando com o número N(R) é necessária. Rejeitar Seletivo (SREJ) é usado para requisitar a retransmissão de um único quadro.

Desconexão Qualquer módulo HDLC pode iniciar uma desconexão, seja por sua própria iniciativa, se

houver algum tipo de falha, ou sob a requisição de seu usuário de camada superior. O HDLC emite uma desconexão, enviando um quadro Desconectar (DISC). O outro lado precisa aceitar a desconexão, respondendo com um UA.

Exemplos de operação Para melhor entender a operação do HDLC, vários exemplos estão na Figura 17.3. Nos diagramas de exemplo, cada seta inclui uma legenda que especifica o tipo de quadro, a definição do bit P/F e, onde apropriado, os valores de N(R) e N(S). A definição do bit P ou F é 1 se a designação está presente e 0 se ausente.

A Figura 17.3a mostra os quadros envolvidos na configuração e desconexão de enlace. A entidade HDLC de um dos lados emite um comando SABM¹ para o outro lado e inicia um temporizador. O outro lado, no recebimento do SABM, retorna uma resposta UA e coloca as variáveis locais e os contadores em seus valores iniciais. A entidade iniciadora recebe a resposta UA, define suas variáveis e contadores e pára o temporizador. A conexão lógica agora está ativa e os dois lados podem começar a transmitir quadros. Se o temporizador expirar sem uma resposta, o originador repetirá o SABM, como ilustrado. Isso seria repetido até um UA ou DM ser recebido ou até que, após determinado número de tentativas, a entidade que tenta iniciação desista e informe falha a uma entidade de gerenciamento. Nesse caso, é necessária a intervenção da camada superior. A mesma figura (Figura 17.3a) mostra o procedimento de desconexão. Um lado emite um comando DISC e o outro responde com uma resposta UA.

A Figura 17.3b ilustra a troca full-duplex de quadros I. Quando uma entidade envia vários quadros I em seqüência sem dados de entrada, o número seqüencial de recebimento, N(R), é simplesmente repetido (por exemplo, 1,1,1; 1,2,1 na direção A para B). Quando uma entidade recebe vários quadros I em seqüência sem ter enviado quadros, então, o número seqüencial de recebimento no próximo quadro que ela enviar precisa refletir a atividade cumulativa (por exemplo, 1,1,3 na direção B para A). Observe que, além dos quadros I, a troca de dados pode envolver quadros de supervisão.

A Figura 17.3c mostra uma operação que envolve uma condição “ocupado”. Essa condição pode surgir porque uma entidade HDLC não é capaz de processar

¹ O termo é: Set Asynchronous Balanced Mode. O comando SABM é uma requisição para iniciar uma troca. A parte ABM do acrônimo se refere ao modo de transferência, um detalhe com o qual não precisamos nos preocupar agora.

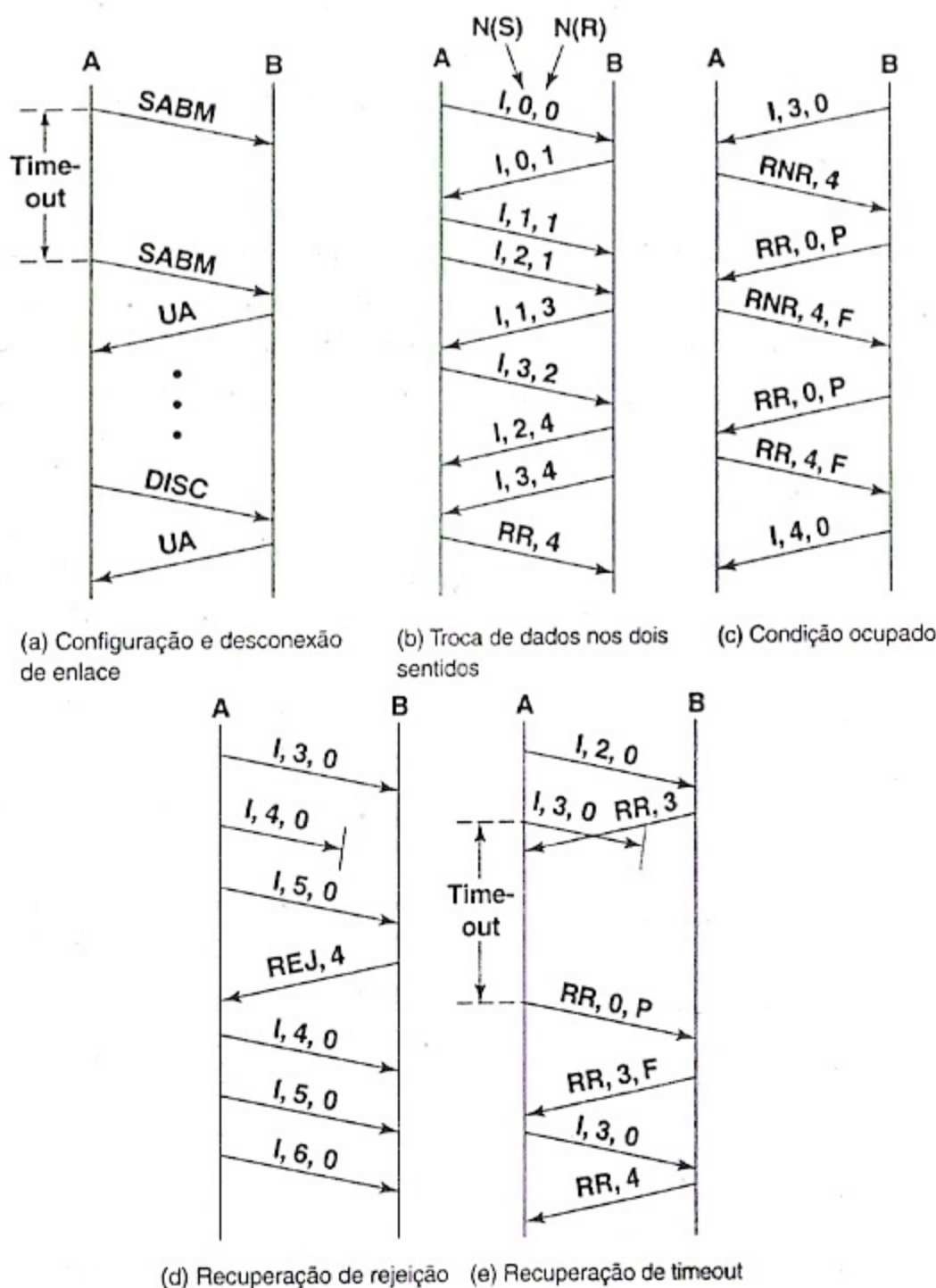


FIGURA 17.3 Exemplos de operação do HDLC.

quadros I tão rapidamente quanto eles estão chegando, ou o usuário pretendido não é capaz de aceitar dados tão rapidamente quanto eles estão chegando nos quadros I. Em qualquer caso, o buffer de recebimento da entidade se enche e ela precisa suspender o fluxo de chegada de quadros I, usando um comando RNR. Nesse exemplo, a estação A emite um RNR, que exige que o outro lado suspenda a transmissão de quadros I. A estação que recebe o RNR normalmente questionará a estação ocupada em algum intervalo periódico, enviando um RR com o bit P ligado. Quando a condição "ocupado" tiver sido liberada, A retorna um RR, e a transmissão de quadros I de B pode continuar.

Um exemplo de recuperação de erro usando o comando REJ está na Figura 17.3d. Nesse exemplo, A transmite quadros I numerados como 3, 4 e 5. O quadro 4 sofre um erro. B detecta o erro e descarta o quadro. Quando B recebe o quadro I de número 5, ele descarta esse quadro porque está fora de ordem e envia um REJ com um N(R) de 4. Isso faz com que A

inicie a retransmissão de todos os quadros I enviados, começando com o quadro 4. Ele pode continuar a enviar quadros adicionais após os quadros retransmitidos.

Um exemplo de recuperação de erro usando um timeout é mostrado na Figura 17.3e. Nesse exemplo, A transmite o quadro I de número 3 como o último em uma sequência de quadros I. O quadro sofre um erro. B detecta o erro e descarta o quadro. Entretanto, B não pode enviar um REJ. Isso é porque não há uma maneira de saber se esse foi um quadro I. Se um erro for detectado em um quadro, todos os bits desse quadro são suspeitos, e o receptor não tem meios de resolvê-lo. A, no entanto, iniciou um temporizador, quando o quadro foi transmitido. Quando o temporizador expira, A inicia a ação de recuperação. Isso normalmente é feito questionando o outro lado com um comando RR com o bit P ligado, para determinar o estado do outro lado. Como o poll exige uma resposta, a entidade receberá um quadro com um campo N(R) e poderá continuar. Nesse caso, a

resposta indica que o quadro 3 estava perdido, fazendo com que A o retransmita.

Esses exemplos não são completos; todavia, eles devem dar uma boa noção do comportamento do HDLC.

17.3 MOTIVAÇÃO PARA MULTIPLEXAÇÃO

Em geral, duas estações em comunicação não utilizarão a capacidade total de um enlace de dados. Para sua eficácia, teria de ser possível compartilhar essa capacidade. Um termo genérico para esse compartilhamento é *multiplexação*.

Uma aplicação comum de multiplexação é na comunicação de longa distância. Os troncos em redes de longa distância são enlaces de fibra óptica, coaxial ou microondas de alta capacidade. Esses enlaces podem transportar simultaneamente grandes quantidades de transmissões de voz e dados usando multiplexação.

A Figura 17.4 mostra a função de multiplexação em sua forma mais simples. Existem n entradas em um multiplexador. O multiplexador é conectado por um único enlace de dados com um demultiplexador. O enlace é capaz de transportar n canais de dados separados. O multiplexador combina (multiplexa) dados das n linhas de entrada e transmite por meio de um enlace de dados de capacidade mais alta. O demultiplexador aceita o fluxo de dados multiplexado, separa (demultiplexa) os dados de acordo com o canal e os distribui para as linhas de saída apropriadas.

O largo uso da multiplexação na comunicação de dados explica-se pelo seguinte:

- Quanto mais alta for a velocidade de dados, mais econômico se torna o sistema de transmissão. Ou seja, para determinada aplicação e por meio de uma certa distância, o custo por kbps diminui com o aumento da velocidade de dados do sistema de transmissão. Da mesma forma, o custo do equipamento de transmissão e recepção, por kbps, diminui com o aumento da velocidade de dados.

- A maioria dos dispositivos de comunicação de dados individuais exige velocidades de dados relativamente modestas. Por exemplo, para muitas aplicações de terminal e computador pessoal que não envolvem acesso à Web ou gráficos pesados, uma velocidade de dados entre 9.600bps e 64kbps geralmente é suficiente.

As afirmações anteriores foram expressas em termos de dispositivos de comunicação de dados. Afirmações semelhantes se aplicam à comunicação de voz. Ou seja, quanto maior a capacidade de um sistema de transmissão, em termos de canais de voz, menor o custo por canal de voz individual, e a capacidade necessária para um único canal de voz é modesta.

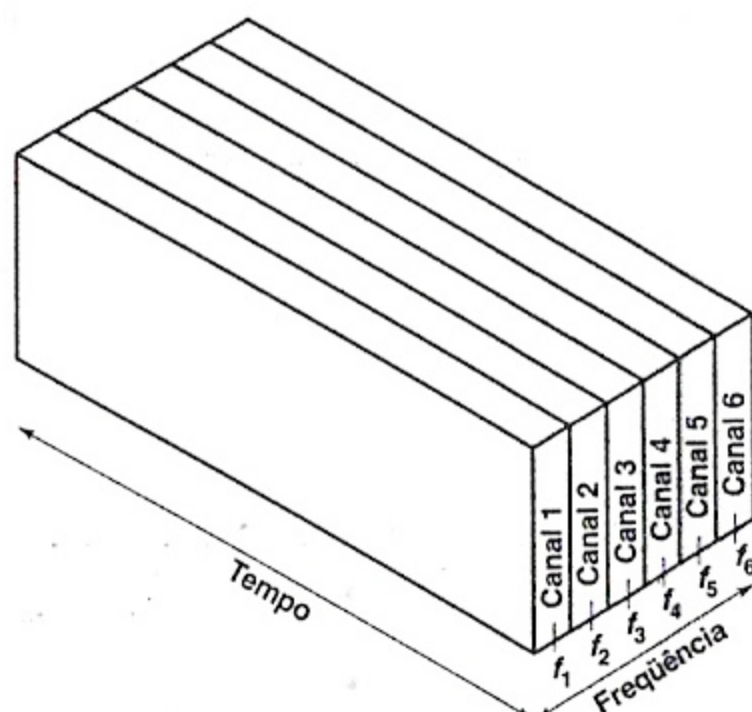
O restante deste capítulo concentra-se em dois tipos de técnicas de multiplexação. O primeiro tipo, a multiplexação por divisão de frequência (FDM), é o mais usado e é familiar a qualquer um que já tenha usado um aparelho de rádio ou televisão. O segundo é um caso especial de multiplexação por divisão de tempo (TDM), conhecido como TDM síncrona. É comumente usado para multiplexar fluxos de voz digitalizados e fluxos de dados.

17.4 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIA

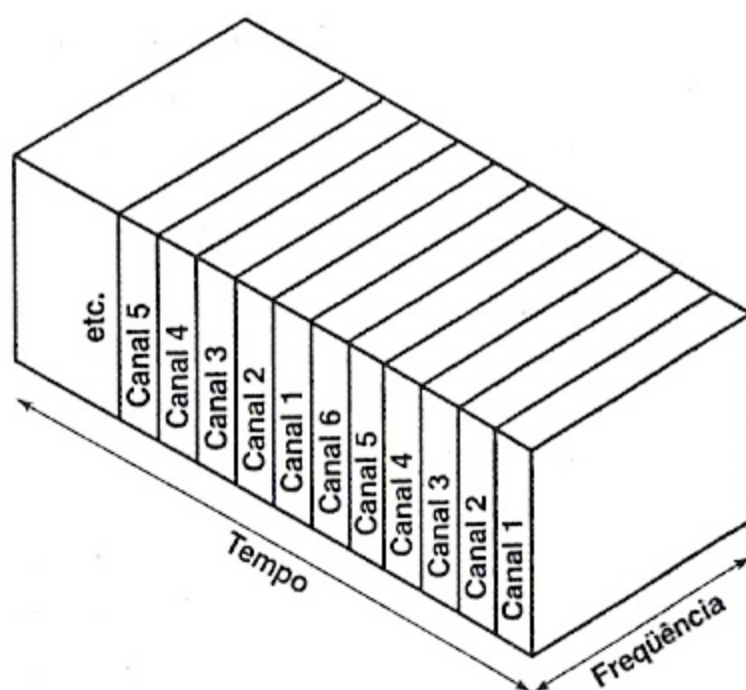
A multiplexação por divisão de frequência (FDM) é uma forma familiar e amplamente usada de multiplexação. Um exemplo simples é seu uso em sistemas de TV a cabo, que transportam múltiplos canais de vídeo em um único cabo. A FDM é possível quando a largura de banda útil do meio de transmissão excede a largura de banda necessária dos sinais a serem transmitidos. Diversos sinais podem ser transportados simultaneamente se cada sinal for modulado em uma frequência de portadora diferente, e as frequências de portadora forem suficientemente separadas para que as larguras de banda dos sinais não se sobreponham. Um caso geral de FDM é mostrado na Figura 17.5a. Seis origens de si-



FIGURA 17.4 Multiplexação.



(a) Multplexação por divisão de frequência



(b) Multplexação por divisão de tempo

FIGURA 17.5 FDM e TDM.

nal são alimentadas em um multiplexador, que modula cada sinal em uma frequência diferente (f_1, \dots, f_6). Cada sinal modulado requer certa largura de banda centralizada em sua frequência de portadora, denominada *canal*. Para evitar interferência, os canais são separados por bandas de guarda, que são partes não utilizadas do espectro.

O sinal composto transmitido através do meio é analógico. Note, entretanto, que os sinais de entrada podem ser digitais ou analógicos. No caso da entrada digital, os sinais de entrada precisam ser passados por modems para serem convertidos em analógicos. Em qualquer caso, cada sinal de entrada analógico precisa, então, ser modulado para movê-lo para a banda de frequência apropriada.

Um exemplo simples de FDM é ilustrado na Figura 17.6, que mostra a transmissão de três sinais de voz simultaneamente através de um meio de transmissão.

Como foi mencionado anteriormente, em geral considera-se a largura de banda de um sinal de voz como de 4kHz, com um espectro efetivo de 300 a 3.400Hz (Figura 17.6a). Se esse sinal for usado para modular em amplitude uma onda portadora de 64kHz, o espectro resultante será o da Figura 17.6b. O sinal modulado possui uma largura de banda de 8kHz, estendendo de 60 até 68kHz. Para usarmos eficientemente a largura de banda, escolhemos transmitir apenas a metade inferior do espectro, chamada de banda lateral inferior. Da mesma forma, os outros dois sinais de voz podem ser modulados para se encaixar nas faixas de 64 a 68kHz e 68 a 72kHz, respectivamente. Esses sinais são, então, combinados no multiplexador para produzir um único sinal com uma faixa de 60 a 72kHz. No lado receptor, o processo de demultiplexação envolve dividir o sinal recebido em três bandas de frequência e, depois, demodular cada sinal novamente para a banda de voz original (0 a

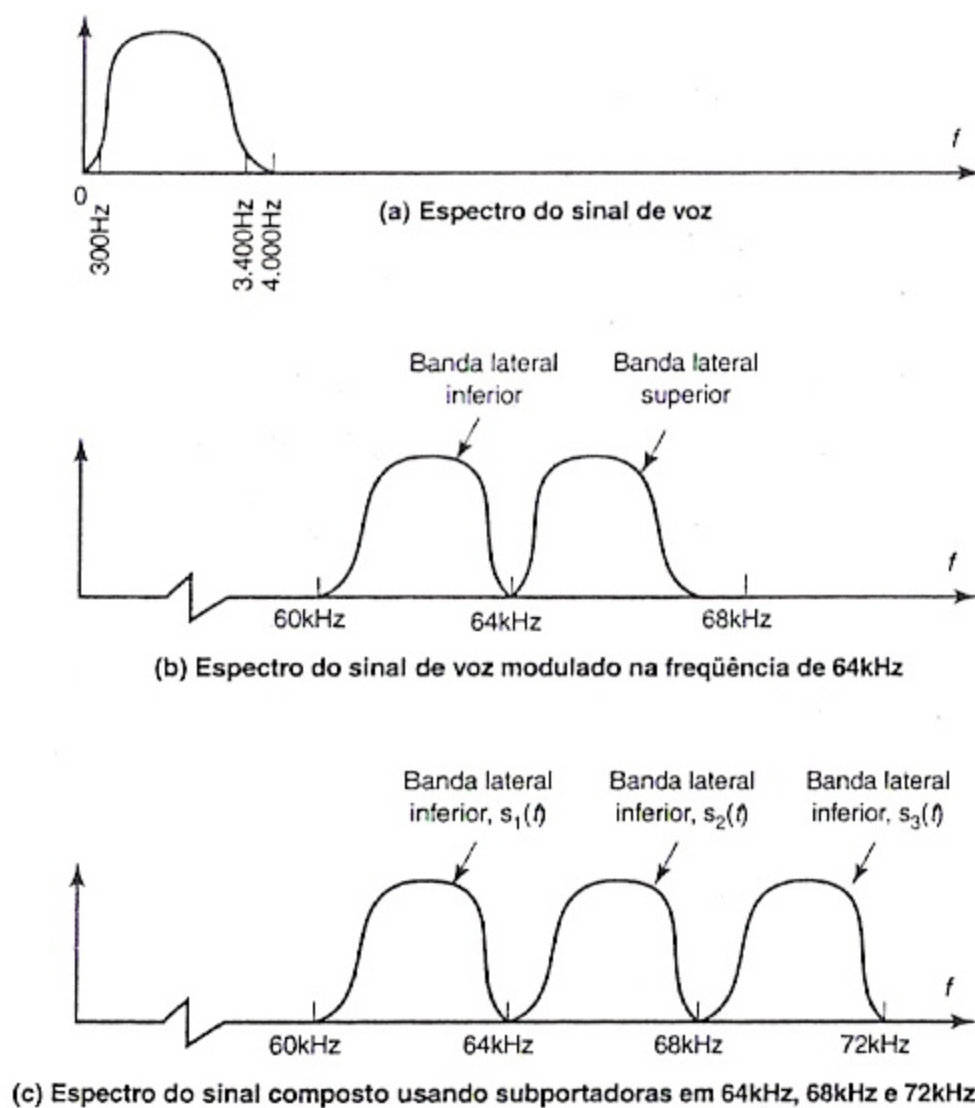


FIGURA 17.6 FDM dos três sinais de banda de voz.

4kHz). Note que existe apenas uma pequena quantidade de sobreposição entre os sinais multiplexados. Como a largura de banda efetiva de cada sinal é realmente menos de 4kHz, nenhuma interferência perceptível é produzida.

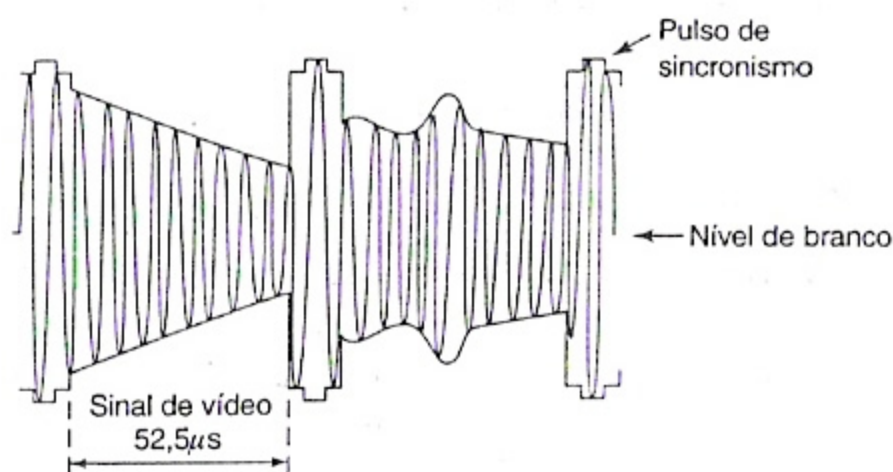
A FDM foi a base da transmissão telefônica durante muito anos; ela realmente é mais eficiente em termos de largura de banda do que os sistemas digitais. O problema é que o ruído é amplificado juntamente com o sinal de voz. Esse fato, além da grande queda no custo dos componentes digitais, levou à substituição generalizada dos sistemas FDM pelos sistemas TDM nas redes telefônicas.

Embora o uso da FDM para transmissão de voz esteja diminuindo rapidamente, ele ainda é usado quase exclusivamente para sistemas de distribuição de televisão, incluindo televisão aberta e TV a cabo. O sinal analógico de televisão, tratado no Capítulo 2, cabe confortavelmente em uma largura de banda de 6MHz. A Figura 17.7 representa o sinal de vídeo transmitido e sua largura de banda. O sinal de vídeo preto-e-branco modula em amplitude um sinal de portadora. O sinal resultante possui uma largura de banda de aproximadamente 5MHz, estando sua maioria acima do sinal de portadora. Uma subportadora de cor separada é usada para transmitir informações de cor. Esta é espaçada da

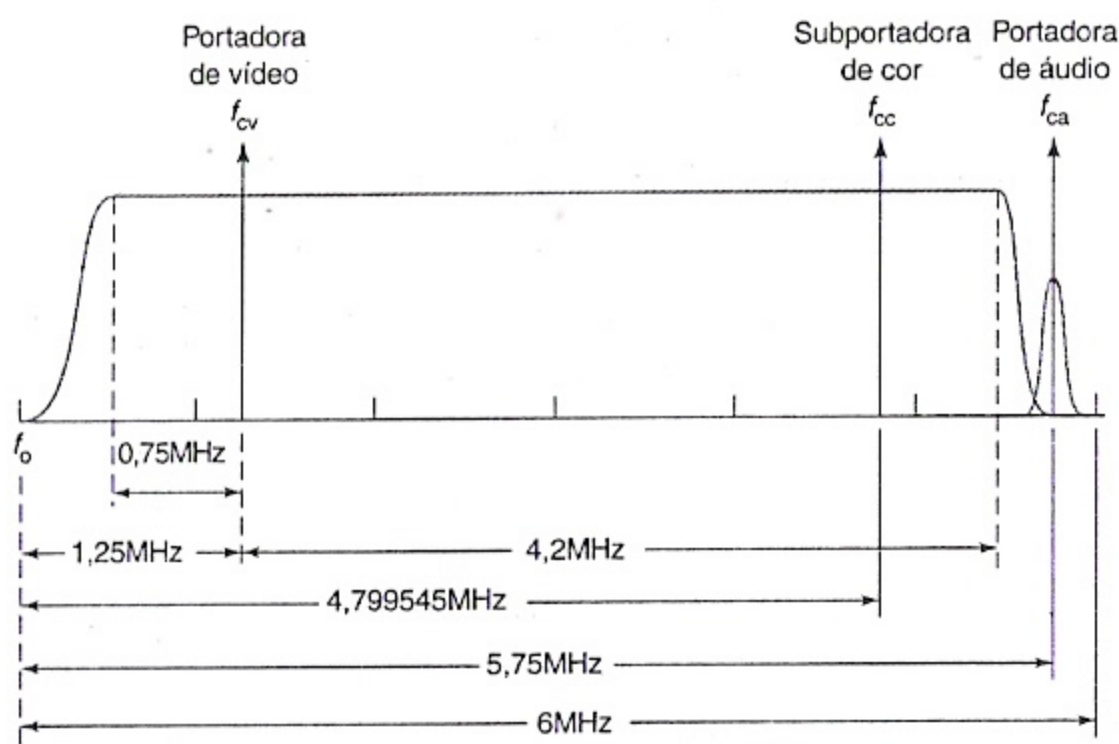
onda portadora principal o suficiente para que basicamente não haja interferência. Finalmente, a parte de áudio do sinal é modulada em uma terceira onda portadora, fora da largura de banda efetiva dos outros dois sinais. O sinal composto cabe em uma largura de banda de 6MHz, com as portadoras de sinal de vídeo, cor e áudio em 1,25MHz, 4,799545MHz e 5,75MHz acima da borda inferior da banda, respectivamente. Portanto, múltiplos sinais de TV podem ter multiplexação de divisão de frequência em um cabo, cada qual com uma largura de banda de 6MHz. Devido à enorme largura de banda do cabo coaxial (500MHz), dezenas de sinais de vídeo podem ser transportados simultaneamente usando a FDM.

Multiplexação por divisão de comprimento de onda

O verdadeiro potencial da fibra óptica é completamente explorado quando vários feixes de luz em diferentes frequências são transmitidos na mesma fibra. Isso é uma forma de multiplexação por divisão de frequência (FDM), mas é comumente chamada de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). Com a WDM, a luz fluindo por meio da fibra consiste em muitas cores, ou comprimentos de onda, cada uma trans-



(a) Modulação de amplitude com sinal de vídeo



(b) Espectro de magnitude do sinal de vídeo de RF

FIGURA 17.7 Sinal de TV transmitido.

portando um canal de dados separado. Em 1997, foi um feito quando o Bell Laboratories pôde demonstrar um sistema WDM com 100 feixes, cada um operando em 10Gbps, perfazendo uma velocidade total de dados de 1 trilhão de bits por segundo (também chamado de 1 terabit por segundo, ou 1Tbps). Sistemas comerciais com 160 canais de 10Gbps agora estão disponíveis. Em um ambiente de laboratório, a Alcatel transportou 256 canais de 39,8Gbps cada um (totalizando 10,1Tbps) ao longo de uma distância de 100km.

Um sistema WDM típico tem a mesma arquitetura geral de outros sistemas FDM. Diversas origens geram um feixe de laser em diferentes comprimentos de onda. Esses são enviados para um multiplexador, que consolida as origens para transmissão em uma única linha de fibra. Os amplificadores ópticos, normalmente afastados dezenas de quilômetros, amplificam todos os comprimentos de onda simultaneamente. Por fim, o sinal composto chega em um demultiplexador, em que os canais componentes são separados e enviados a receptores no ponto de destino.

A maioria dos sistemas WDM opera na faixa de 1.550nm. Nos primeiros sistemas, 200GHz eram alocados para cada canal, mas, hoje, a maioria dos sistemas WDM usa espaçamento de 50GHz. O espaçamento de canal definido na ITU-T G.692, que acomoda 80 canais de 50GHz, é resumido na Tabela 17.2.

O termo **multiplexação por divisão de comprimento de onda densa (DWDM)** é frequentemente visto em bibliografias especializadas. Não há qualquer definição oficial ou padrão desse termo. O termo conota o uso de mais canais, espaçados mais proximamente, do que na WDM normal. Geralmente, um espaçamento de canal de 200GHz ou menos poderia ser considerado denso.

ADSL

A linha de assinante digital assimétrica fornece um interessante exemplo do uso da FDM. Nesta seção, fornecemos um breve resumo do método.

Projeto da ADSL O termo *assimétrico* é usado porque a ADSL fornece mais capacidade downstream (do es-

Tabela 17.2 Espaçamento de canal WDM da ITU (G.692)

Frequência (THz)	Comprimento de onda (no vácuo) (nm)	50GHz	100GHz	200GHz
196,10	1528,77	X	X	X
196,05	1529,16	X		
196,00	1529,55	X	X	
195,95	1529,94	X		
195,90	1530,33	X	X	X
195,85	1530,72	X		
195,80	1531,12	X	X	
195,75	1531,51	X		
195,70	1531,90	X	X	X
195,65	1532,29	X		
195,60	1532,68	X	X	
...	...			
192,10	1560,61	X	X	X

critório central da operadora para o local do cliente) do que upstream (do cliente para a operadora). A ADSL foi originalmente destinada a atender necessidades de vídeo por demanda e serviços relacionados. Essa aplicação não se materializou. Entretanto, desde a introdução da tecnologia ADSL, cresceu a demanda por acesso de alta velocidade à Internet. Em geral, o usuário exige capacidade muito mais alta para transmissão downstream (download) do que upstream (upload). A maioria das transmissões por parte do usuário está na forma de toques de teclado ou transmissão de curtas mensagens de e-mail, enquanto o tráfego recebido, especialmente o tráfego da Web, pode envolver grandes quantidades de dados e incluir imagens ou mesmo vídeo. Portanto, a ADSL fornece uma combinação perfeita para as necessidades da Internet.

A ADSL usa multiplexação de divisão de frequência (FDM) como uma nova maneira de explorar a capacidade de 1MHz do par trançado. Existem três elementos na estratégia da ADSL (Figura 17.8):

- Reservar os 25kHz inferiores para voz, conhecidos como POTS (Plain Old Telephone Service). A voz é transportada apenas na banda de 0 a 4kHz; a largura de banda adicional é para prevenir linha cruzada entre os canais de voz e de dados.

- Usar cancelamento de eco² ou FDM para alocar duas bandas, uma banda upstream menor e uma banda downstream maior.
- Usar FDM dentro das bandas upstream e downstream. Nesse caso, um único fluxo de bits é dividido em vários fluxos de bits paralelos, e cada parte é transportada em uma banda de frequência separada. Uma técnica comumente usada é conhecida como multi-ton discreto, explicado a seguir.

Quando o cancelamento de eco é usado, toda a banda de frequência para o canal upstream se sobrepõe à parte inferior do canal downstream. Isso apresenta duas vantagens em relação ao uso de bandas de frequência diferentes para upstream e downstream:

- Quanto mais alta a frequência, maior a atenuação. Com o cancelamento de eco, mais da largura de banda downstream está na parte “boa” do espectro.

² O cancelamento de eco é uma técnica de processamento de sinal que possibilita a transmissão de sinais em ambas as direções na mesma banda de frequência em uma única linha de transmissão simultaneamente. Em essência, um transmissor precisa subtrair o eco de sua própria transmissão do sinal que chega para recuperar o sinal enviado pelo outro lado.

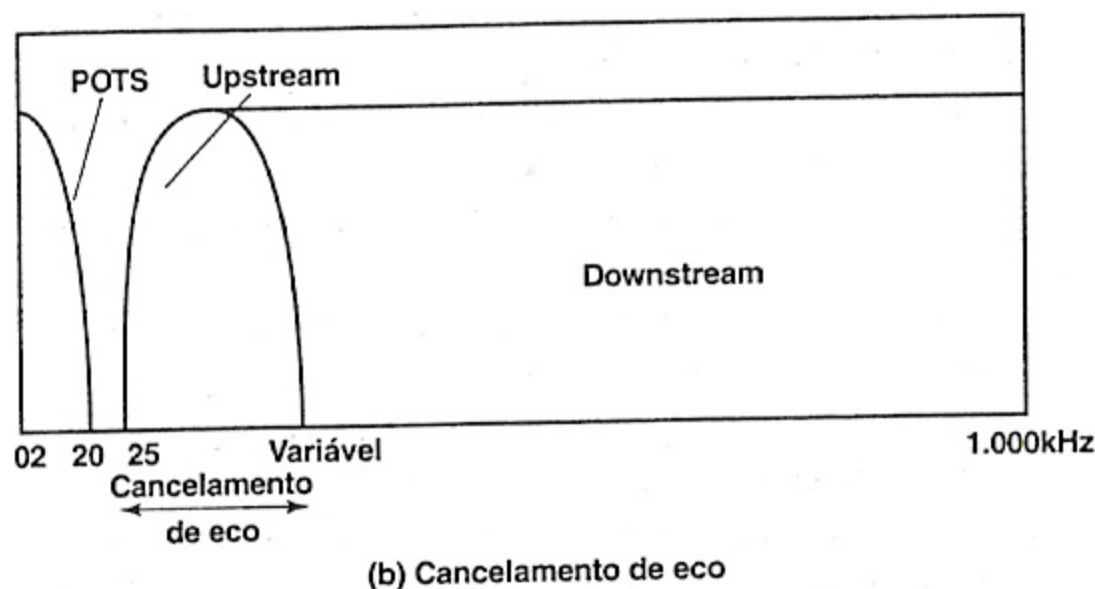
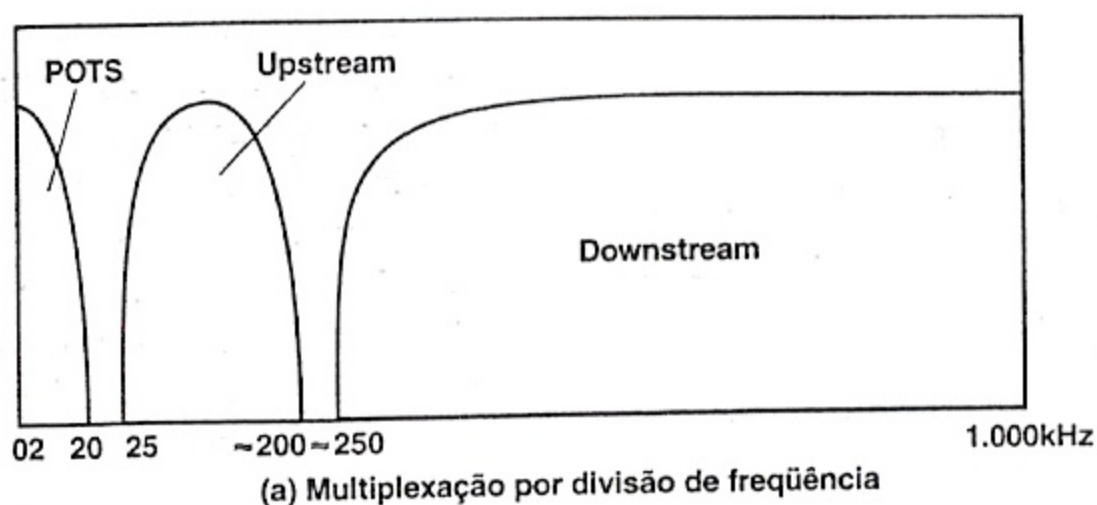


FIGURA 17.8 Configuração do canal ADSL.

O projeto com cancelamento de eco é mais flexível para mudar a capacidade upstream. O canal upstream pode se estender para cima sem invadir o downstream; em vez disso, a área da sobreposição é estendida.

A desvantagem do cancelamento de eco é a necessidade da lógica de cancelamento de eco nos dois lados da linha.

O esquema ADSL propicia um alcance de até 5,5km, dependendo do diâmetro do cabo e de sua qualidade. Isso basta para cobrir cerca de 95% de todas as linhas de assinante dos Estados Unidos e deve fornecer a mesma cobertura em outros países.

Multitom discreto O multitom discreto (DMT) usa vários sinais de portadora em diferentes frequências, enviando alguns bits em cada canal. A banda de transmissão disponível (upstream ou downstream) é dividida em vários subcanais de 4kHz. Na inicialização, o modem DMT envia sinais de teste em cada subcanal

para determinar a relação sinal/ruído. O modem, então, atribui mais bits aos canais com melhor qualidade de transmissão de sinal e menos bits aos canais com pior qualidade de transmissão de sinal. A Figura 17.9 ilustra esse processo. Cada subcanal pode transportar uma velocidade de dados de 0 a 60kbps. A figura mostra uma situação característica de atenuação crescente e, portanto, da relação sinal/ruído decrescente em frequências mais altas. Como resultado, os subcanais de frequência mais alta transportam menos da carga.

Os atuais projetos de ADSL/DMT utilizam 256 subcanais downstream. Teoricamente, com cada subcanal de 4kHz que transporta 60kbps, seria possível transmitir em uma velocidade de 15,36Mbps. Na prática, entretanto, as deficiências de transmissão impedem a obtenção dessa velocidade de dados. As implementações atuais operam em velocidades de 1,5 a 9Mbps, dependendo da distância e da qualidade da linha.

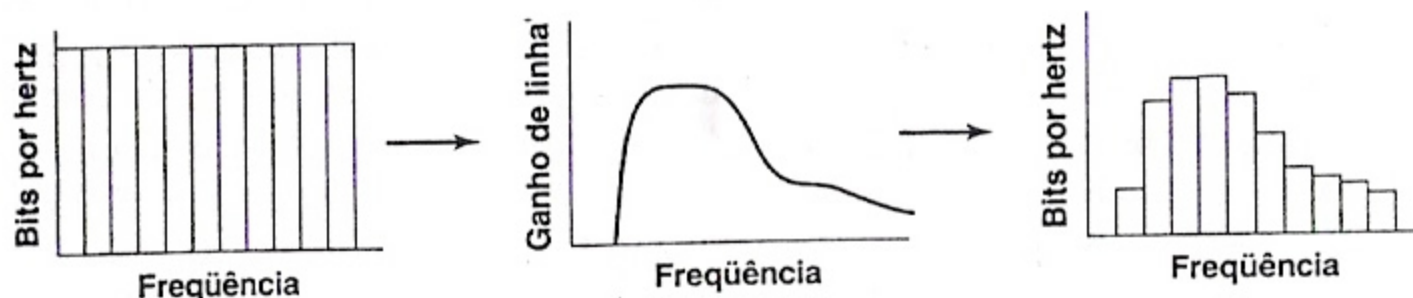


FIGURA 17.9 Bits DMT por alocação de canal.

17.5 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE TEMPO SÍNCRONA

O mecanismo TDM

O outro importante tipo de multiplexação é a **multiplexação por divisão de tempo (TDM)**. Nesta seção, examinaremos a **TDM síncrona**, que costuma ser denominada simplesmente TDM.

A multiplexação por divisão de tempo é possível quando a velocidade de dados do meio de transmissão excede a velocidade de dados exigida para os sinais a serem transmitidos. Diversos sinais digitais, ou sinais analógicos que transportam dados digitais, podem ser transportados simultaneamente, intercalando partes de cada sinal no tempo. Um caso geral de TDM é mostrado na Figura 17.5b. Seis origens de sinal são alimentadas em um multiplexador, que intercala os bits de cada sinal, alternando os bits transmitidos de cada um dos sinais de uma maneira circular. Por exemplo, o multiplexador na Figura 17.5b tem seis entradas que poderiam ser, digamos, cada qual de 9,6kbps. Uma única linha com uma capacidade de pelo menos 57,6kbps acomoda todas as seis origens.

A Figura 17.10 ilustra um exemplo simples de TDM, apresentando a transmissão dos três sinais de dados simultaneamente através de um meio de transmissão. Nesse exemplo, cada origem opera em 64 kbps. A saída de cada origem é brevemente colocada em buffer. Em geral, cada buffer possui um bit ou um caractere de tamanho. Os buffers são lidos de maneira circular para formar um fluxo de dados digital composto. As operações de leitura são bastante rápidas para que cada buf-

fer seja esvaziado antes de chegarem mais dados. Os dados lidos do buffer são combinados pelo multiplexador em um fluxo de dados composto. Assim, a velocidade de dados transmitida pelo multiplexador precisa, pelo menos, ser igual à soma das velocidades de dados das três entradas ($3 \times 64 = 192\text{kbps}$). O sinal original produzido pelo multiplexador pode ser transmitido digitalmente ou passado por um modem, para transmissão de um sinal analógico. Em qualquer caso, a transmissão normalmente é síncrona (e não assíncrona). No lado receptor, o processo de demultiplexação envolve distribuir os dados que chegam entre três buffers de destino.

Os dados transmitidos por um sistema de TDM síncrona possuem o formato como o da Figura 17.11. Os dados são organizados em **quadros**, cada qual contém um ciclo de lacunas de tempo. Em cada quadro, uma ou mais lacunas são dedicadas a cada origem de dados. A transmissão consiste na transferência de uma sequência de quadros. O conjunto de lacunas de tempo dedicadas a cada origem, de quadro para quadro, é considerado um **canal**. Observe que esse é o mesmo termo usado para FDM. Os dois usos do termo *canal* são logicamente equivalentes. Nos dois casos, uma parte da capacidade de transmissão é dedicada aos sinais de uma única origem; essa origem vê um canal de velocidade de dados constante ou largura de banda constante para transmissão.

O tamanho da lacuna é igual ao tamanho do buffer do transmissor, normalmente um bit ou um byte (caractere). Utiliza-se a técnica de intercalação de bytes com origens assíncronas e síncronas. Cada lacuna de tempo contém um byte de dados. Em geral, os bits de início e

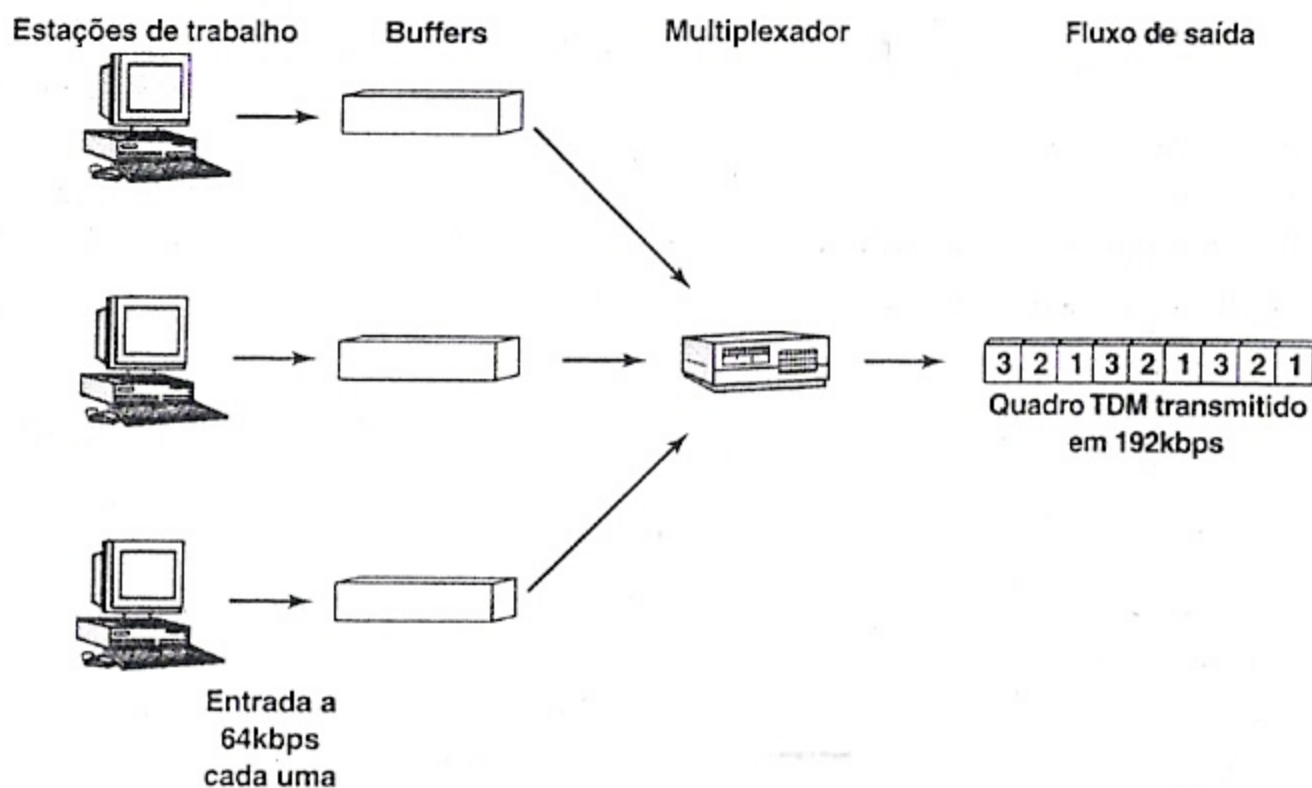


FIGURA 17.10 TDM síncrona de três canais de dados.

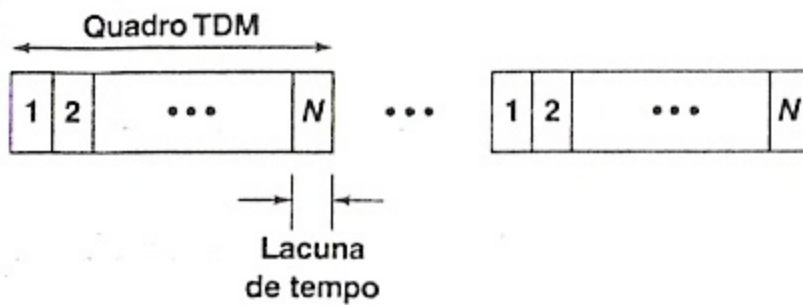


FIGURA 17.11 Estrutura de quadro TDM.

de fim de cada caractere são eliminados antes da transmissão e re-inseridos pelo receptor, melhorando, assim, a eficiência. A técnica de intercalação de bit é usada com origens síncronas.

A TDM síncrona é chamada de síncrona não porque a transmissão síncrona é usada, mas porque as lacunas de tempo são atribuídas previamente às origens e são fixas. As lacunas de tempo para uma determinada origem são transmitidas quer a origem tenha dados para enviar ou não. É claro, esse também é o caso no que diz respeito a FDM: uma banda de frequência é dedicada a uma origem específica, esteja a origem transmitindo em um determinado momento ou não. Nos dois casos, a capacidade é desperdiçada em nome da simplicidade de implementação. Contudo, mesmo quando a atribuição fixa é usada, é possível para um dispositivo de TDM síncrona manipular origens de diferentes velocidades de dados. Por exemplo, uma lacuna por quadro poderia ser atribuída aos dispositivos de entrada mais lentos, enquanto várias lacunas por quadro seriam atribuídas aos dispositivos mais rápidos.

Sistemas de portadora digitais

O sistema de onda portadora de longa distância fornecido nos Estados Unidos e em todo o mundo foi projetado para transmitir sinais de voz por meio de enlaces de transmissão de alta capacidade, como fibra óptica, cabo

coaxial e microondas. Parte da evolução dessas redes de telecomunicações para a tecnologia digital tem sido a adoção de estruturas de transmissão de TDM síncrona. Nos Estados Unidos, a AT&T desenvolveu uma hierarquia de estruturas de TDM de várias capacidades; essa estrutura também está em uso no Canadá e no Japão. Uma hierarquia semelhante, mas, infelizmente, não idêntica, foi adotada internacionalmente sob o patrocínio da ITU-T (Tabela 17.3).

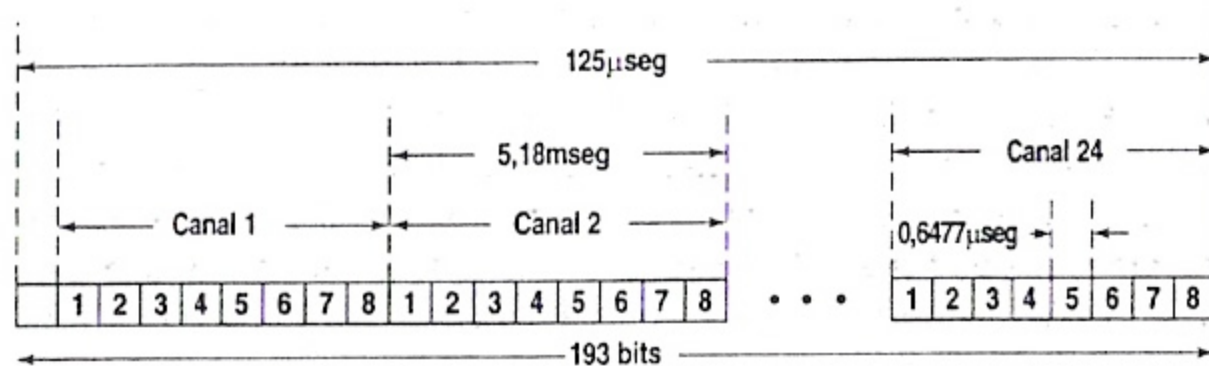
A base da hierarquia TDM (na América do Norte e no Japão) é o formato de transmissão DS-1 (Figura 17.12), que multiplexa 24 canais. Cada quadro contém 8 bits por canal, além de um bit de enquadramento para um total de $24 \times 8 + 1 = 193$ bits. Para transmissão de voz, aplicam-se as seguintes regras. Cada canal contém uma word de dados de voz digitalizada. O sinal de voz analógico original é digitalizado mediante a modulação por codificação de pulso (PCM) em uma velocidade de 8.000 amostras por segundo. Assim, cada lacuna de canal e, portanto, cada quadro precisa repetir 8.000 vezes por segundo. Com um tamanho de quadro de 193 bits, temos uma velocidade de dados de $8.000 \times 193 = 1,544$ Mbps. Para cinco de cada seis quadros, amostras PCM de 8 bits são usadas. Para cada sexto quadro, cada canal contém uma palavra PCM de 7 bits mais um bit de sinalização. Os bits de sinalização formam um fluxo para cada canal de voz que contém informações de controle e roteamento de rede. Por exemplo, utilizam-se os sinais de controle para estabelecer uma conexão ou terminar uma chamada.

O mesmo formato DS-1 é utilizado para fornecer serviço de dados digitais. Para compatibilidade com a voz, utiliza-se a mesma velocidade de dados de 1,544 Mbps. Neste caso, 23 canais de dados são fornecidos. A 24ª posição de canal é reservada para um byte de sincronização especial, que permite re-enquadramento

Tabela 17.3 Padrões de portadora TDM norte-americanos e internacionais

Norte-americanos		
Designação	Número de canais de voz	Velocidade de dados (Mbps)
DS-1	24	1,544
DS-1C	48	3,152
DS-2	96	6,312
DS-3	672	44,736
DS-4	4032	274,176

Internacionais (ITU-T)		
Nível	Número de canais de voz	Velocidade de dados (Mbps)
1	30	2,048
2	120	8,448
3	480	34,368
4	1920	139,264
5	7680	565,148



Notas:

1. O primeiro bit é um bit de enquadramento, usado para sincronização.
2. Canais de voz:
 - PCM de 8 bits usado em cinco dos seis quadros.
 - PCM de 7 bits usado em cada sexto quadro; o bit 8 de cada canal é um bit de sinalização.
3. Canais de dados:
 - O Canal 24 é usado para sinalização apenas em alguns esquemas.
 - Bits 1 a 7 usados para serviço de 56kbps.
 - Bits 2 a 7 usados para serviço de 9,6, 4,8 e 2,4kbps.

FIGURA 17.12 Formato de transmissão DS-1.

mais rápido e confiável após um erro de enquadramento. Dentro de cada canal, 7 bits por quadro são usados para dados, com o oitavo bit usado para indicar se o canal, referente a esse quadro, contém dados de usuário ou dados de controle do sistema. Com 7 bits por canal, e como cada quadro é repetido 8.000 vezes por segundo, é possível fornecer uma velocidade de dados de 56 kbps por canal. Velocidades de dados menores são obtidas com uma técnica conhecida como multiplexação subvelocidade. Para essa técnica, um bit adicional é retirado de cada canal para indicar qual taxa de multiplexação subvelocidade está sendo fornecida. Isso deixa uma capacidade total por canal de $6 \times 8.000 = 48$ kbps. Essa capacidade é usada para multiplexar 5 canais de 9,6kbps, 10 canais de 4,8kbps ou 20 canais de 2,4kbps. Por exemplo, se o canal 2 for usado para fornecer serviço de 9,6kbps, então, até 5 subcanais de dados compartilham esse canal. Os dados para cada subcanal aparecem como 6 bits no canal 2 a cada quinto quadro.

Finalmente, o formato DS-1 pode ser usado para transportar uma combinação de canais de voz e dados. Nesse caso, todos os 24 canais são utilizados; nenhum byte de sincronização é fornecido.

Acima dessa velocidade de dados básica de 1,544Mbps, a multiplexação de nível mais alto é conseguida com a intercalação de bits de entradas DS-1. Por exemplo, o sistema de transmissão DS-2 combina quatro entradas DS-1 em um fluxo de 6,312Mbps. Os dados das quatro origens são intercalados 12 bits de cada vez. Note que $1,544 \times 4 = 6,176$ Mbps. A capacidade restante é usada para bits de enquadramento e de controle.

As designações DS-1, DS-1C etc. referem-se ao esquema de multiplexação usado para transportar informações. A AT&T e outras operadoras fornecem re-

ursos de transmissão que aceitam esses vários sinais multiplexados, chamados de sistemas de portadora. Esses são designados com um rótulo "T". Assim, a portadora T-1 fornece uma velocidade de dados de 1,544Mbps e, portanto, é capaz de aceitar o formato multiplex DS-1, e assim por diante para velocidades de dados mais altas.

Facilidades T-1

A facilidade T-1 é amplamente usada nas empresas como uma maneira de suportar capacidade de rede e controlar os custos. O uso externo mais comum (não parte da rede telefônica) das facilidades T-1 é para transmissão dedicada alugada entre bases de cliente. Essas facilidades permitem que o cliente configure redes privadas para transportar tráfego em toda uma organização. Exemplos de aplicações para essas redes privadas incluem os seguintes:

- **Redes privadas de voz:** Quando existe uma quantidade substancial de tráfego de voz entre locais, uma rede privada alugada pode fornecer uma considerável economia em relação ao uso de sistemas discados.
- **Redes privadas de dados:** Da mesma forma, altos volumes de dados entre dois ou mais locais podem ser suportados pelas linhas T-1.
- **Videoteleconferência:** Torna possível a transmissão de vídeo de alta qualidade. À medida que a necessidade de largura de banda para vídeo diminui, os enlaces de videoconferência podem compartilhar facilidades T-1 com outras aplicações.

- **Fax digital de alta velocidade:** Permite a transmissão rápida de imagens de fax e, dependendo da carga do fax, pode ser capaz de compartilhar o enlace T-1 com outras aplicações.
- **Acesso à Internet:** Se for previsto um alto volume de tráfego entre o local e a Internet, será necessária uma linha de acesso de alta capacidade até o provedor de serviço de Internet.

Para usuários com grandes necessidades de transmissão, o uso da rede T-1 é atraente por duas razões. Em primeiro lugar, uma T-1 permite configurações mais simples do que o uso de uma combinação de ofertas de velocidade mais baixa. Em segundo lugar, os serviços de transmissão T-1 são menos dispendiosos.

Outro uso comum da linha T-1 é no fornecimento de acesso de alta velocidade dos locais do cliente até a rede telefônica. Nessa aplicação, uma rede local, ou central telefônica no local do cliente, suporta diversos dispositivos que geram tráfego para fora do local o suficiente para exigir o uso de uma linha de acesso T-1 até a rede pública.

SONET/SDH

SONET (Synchronous Optical Network) é uma interface de transmissão óptica originalmente proposta pela BellCore e padronizada pelo ANSI. Uma versão compatível, chamada de Synchronous Digital Hierarchy (SDH), foi publicada pelo ITU-T nas recomendações G.707, G.708 e G.709.³ SONET destina-se a fornecer uma especificação para aproveitar a capacidade de transmissão digital de alta velocidade da fibra óptica.

Hierarquia de sinal A especificação SONET define uma hierarquia de velocidades de dados digitais padronizadas (Tabela 17.4). O nível mais baixo, denominado STS-1 (Synchronous Transport Signal nível 1) ou

OC-1 (Optical Carrier nível 1),⁴ é 51,84Mbps. Essa velocidade pode ser usada para transportar um único sinal DS-3 ou um grupo de sinais de velocidade mais baixa, como DS1, DS1C, DS2, além de velocidades ITU-T (como 2,048Mbps).

Vários sinais STS-1 podem ser combinados para formar um sinal STS-N. O sinal é criado por bytes intercalados de N sinais STS-1, que são mutuamente sincronizados. Para a Synchronous Digital Hierarchy ITU-T, a velocidade mais baixa é 155,52Mbps, que é denominada STM-1. Isso corresponde à SONET-3.

Formato de quadro O bloco de construção básico da SONET é o quadro STS-1, que consiste em 810 octetos e é transmitido uma vez a cada 125 μ s, para uma velocidade de dados total de 51,84Mbps (Figura 17.13a). O quadro pode ser visto logicamente como uma matriz de 9 linhas de 90 octetos cada, com a transmissão sendo uma linha de cada vez, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

As três primeiras colunas (3 octetos \times 9 linhas = 27 octetos) de um quadro são dedicadas aos octetos de overhead, chamados de overhead de seção e overhead de linha, que se referem a diferentes níveis de detalhe ao descrever uma transmissão SONET. Esses octetos transmitem não só informações de sincronização, como também informações de gerenciamento de rede.

O restante do quadro é o payload, que é fornecido pela camada lógica da SONET denominado caminho. O payload inclui uma coluna de overhead de caminho, que não está necessariamente na primeira posição de coluna disponível; o overhead de linha contém um ponteiro que indica onde o overhead de caminho começa.

A Figura 17.13b mostra o formato geral para quadros de velocidade mais alta, usando a designação ITU-T.

³ A seguir, usaremos o termo *SONET* para nos referir às duas especificações. Onde houver diferenças, estas serão indicadas.

⁴ Uma velocidade OC-N é o equivalente óptico de um sinal elétrico STS-N. Os dispositivos de usuário final transmitem e recebem sinais elétricos; esses precisam ser convertidos de e para sinais ópticos para transmissão por meio de fibra óptica.

Tabela 17.4 Hierarquia de sinal SONET/SDH

Designação SONET	Designação ITU-T	Velocidade de dados	Velocidade de Payload (Mbps)
STS-1/OC-1	STM-0	51,84Mbps	50,112Mbps
STS-3/OC-3	STM-1	155,52Mbps	150,336Mbps
STS-9/OC-9		466,56Mbps	451,008Mbps
STS-12/OC-12	STM-4	622,08Mbps	601,344Mbps
STS-18/OC-18		933,12Mbps	902,016Mbps
STS-24/OC-24		1,24416Gbps	1,202688Gbps
STS-36/OC-36		1,86624Gbps	1,804032Gbps
STS-48/OC-48	STM-16	2,48832Gbps	2,405376Gbps
STS-96/OC-96		4,87664Gbps	4,810752Gbps
STS-192/OC-192	STM-64	9,95328Gbps	9,621504Gbps
STS-768	STM-256	39,81312Gbps	38,486016Gbps
STS-3072		159,25248Gbps	1,53944064Gbps

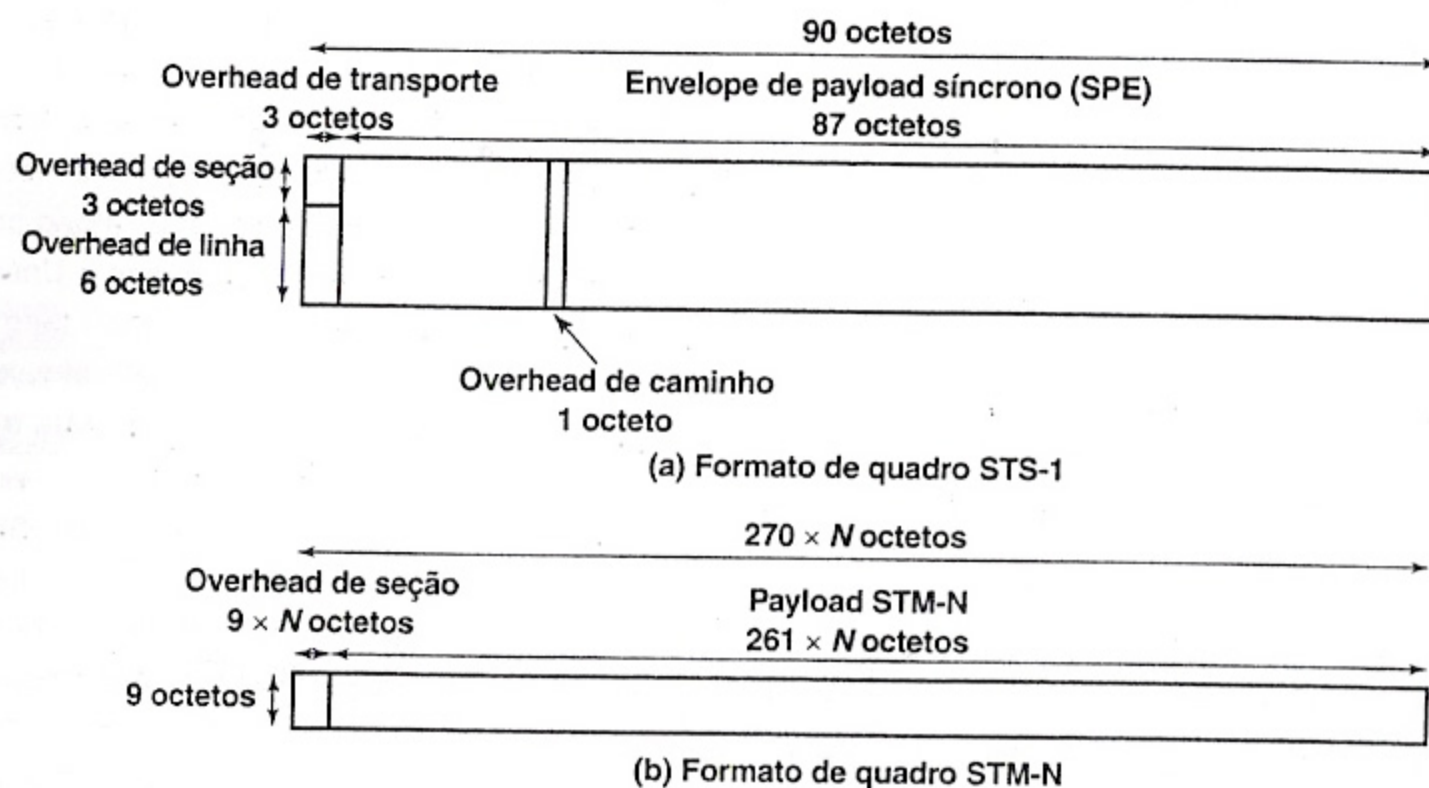


FIGURA 17.13 Formatos de quadro SONET/SDH.

NOTA DE APLICAÇÃO

Mudanças na comunicação

É interessante notar as mudanças nos mecanismos que usamos na comunicação de dados. De especial interesse é a forma como os dados se transferem de um local para outro, em comparação com dez ou mesmo cinco anos atrás. Os mecanismos que implementamos para garantir transmissões bem-sucedidas tornam-se desatualizados para logo serem substituídos por outras ferramentas de eliminação de falhas. Essas mudanças nem sempre são o resultado de avanços na tecnologia; muitas delas ocorrem devido a mudanças no *quê* comunicamos e com quem.

A tecnologia certamente avança e cria novas formas de fazer as coisas. Quando analisamos as redes remotas e, em especial, os protocolos utilizados, podemos verificar mudanças na qualidade das conexões. Por exemplo, o X.25 é um protocolo usado para conectar locais com a WAN. Ele possui várias funções embutidas para garantir conectividade à prova de erros. Todos os nós que fazem parte da rede realizam essas verificações. Com os progressos na transmissão de dados, tanto no equipamento de transmissão quanto nos meios utilizados, essa quantidade de verificação de erros não é mais necessária e, hoje, é considerada um overhead desnecessário.

Entretanto, esse overhead poderia não ter sido um problema se não fosse a enorme demanda por conectividade para fora do local. Tem havido uma mudança fundamental na maneira como trocamos informações. Cada vez mais vemos pessoas e organizações enviarem dados para locais "além do horizonte". Houve um tempo em que os projetistas de rede usavam a chamada "regra 80/20". Essa regra descrevia o que alguns denominam "localidade de referência", que simplesmente significa "com quem estamos falando?". Com a regra 80/20, 80% de nossos dados permaneciam na rede doméstica. Os 20% representavam o tráfego que poderia fluir para os nós externos. Isso significa que, na maior parte do tempo, os nós individuais não precisavam de conexões externas.

Com o surgimento do processamento distribuído, conexões seguras entre locais corporativos, Web sites, hotmail, sites de adultos, mecanismos de busca e importantes recursos de pesquisa disponíveis on-line, essa regra foi quase completamente invertida. Agora, precisamos de grandes aumentos na velocidade e precisão para não congestionar as linhas de saída com as retransmissões. Novas aplicações podem acrescentar-se a essa necessidade de conectividade externa. A indústria de games está aplicando enormes somas de dinheiro no desenvolvimento de poderosos mundos virtuais, que são tão fascinantes a ponto de garantir sua porcentagem de usuários on-line. O game on-line "Everquest" é um exemplo perfeito dessa tendência. Temos visto migrações do X.25 para o Frame Relay, portadoras T e ATM, que são seguidos da SONET. A próxima geração poderá efetuar toda a transferência de informações por meio de enlaces Ethernet de 10Gbps ou algo ainda mais rápido.

As universidades são, potencionalmente, o melhor exemplo de organizações afetadas por essa tendência. Uma classificação pela qual as universidades competem é a lista "most wired" ("os mais ligados"), como pode ser visto nos relatórios Internet Life do Yahoo!. Constantes atualizações para melhorar as velocidades de enlace de desktop, a capacidade de roteador, o suporte de protocolo, a mobilidade sem fio e os enlaces offsite são parte dessa corrida para ser um "superligado". Essa lista também inclui uma variedade de novas políticas para uso e segurança aceitáveis em redes de campus. Os alunos podem impor altas demandas na infra-estrutura. A maioria dos professores provavelmente concordaria que, sempre que há novas ferramentas ou mecanismos para facilitar a comunicação e o compartilhamento de arquivos pela rede, os alunos os encontram e os implementam.

Mas os enlaces para o mundo externo não são as únicas mudanças no modo como trocamos informações. A comunicação sem fio é outra área de demanda para redes universitárias e não-acadêmicas. As redes sem fio têm amplos efeitos em termos de suporte, segurança e gerenciamento. As pessoas, agora, querem estar conectadas o tempo todo e onde quer que estejam. Isso significa que as aplicações exigirão o que chamamos de persistência. Esse termo se refere a uma capacidade de conectividade transparente a mudanças de tempo, topologia, protocolo e velocidade enquanto um usuário está em movimento. A tecnologia mais óbvia a ser colocada em uso é a 802.11, mas a lista também precisa incluir o MobileIP (para assegurar conectividade de roaming) e o IPv6 para acomodar o número maior de usuários e a qualidade do serviço que eles desejam. Grandes transformações na telefonia também serão parte dessa migração, enquanto mudamos para uma existência mais baseada no IP.

Mudar para os sistemas sem fio também significa mais dificuldades de desempenho, já que os usuários acostumados com conexões dedicadas de 10 ou 100Mbps, agora, precisam compartilhar enlaces mais lentos e mais suscetíveis a erros. Isso requer que os provedores garantam algum nível de qualidade, maiores níveis de acesso a nós individuais e controle de interferência de rádio. Embora esse não seja um dos métodos de controle de erros mais familiares, ficar livre ou eliminar fontes de interferência melhorará a vazão e reduzirá erros nos enlaces sem fio.

À medida que mudamos de uma arquitetura para a próxima e de um conjunto de protocolo para outro, os métodos de controle de fluxo e de erros podem mudar, mas os objetivos permanecem os mesmos. Os enlaces precisam ser controlados para reduzir erros e garantir conectividade. Além de entender os novos protocolos, é importante que os provedores sigam o fluxo das informações, enquanto os usuários tomam caminhos diferentes e mudam os requisitos de sistema.

17.6 RESUMO

Devido à possibilidade de erros de transmissão, e como o receptor dos dados podem precisar regular a velocidade em que os dados chegam, as técnicas de sincronização e interface, sozinhas, são insuficientes. É necessário impor uma camada de controle em cada dispositivo de comunicação que forneça funções como controle de fluxo, detecção de erros e controle de erros. Essa camada de controle é conhecida como um protocolo de controle de enlace de dados. O mais comum desses protocolos é o HDLC. Outros protocolos de controle de enlace de dados semelhantes também estão em uso.

A multiplexação permite que várias origens de transmissão compartilhem uma maior capacidade de transmissão. Duas formas de multiplexação são a multiplexação por divisão de frequência (FDM) e a multiplexação por divisão de tempo (TDM).

17.7 Leituras e Web sites recomendados

Uma abordagem dos sistemas de portadora FDM e TDM encontra-se em [FREE98] e [CARN99]. A SONET é tratada em mais profundidade em [STAL04].

CARN99 Carne, E. *Telecommunications Primer: Data, Voice, and Video Communications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.

FREE98 Freeman, R. *Telecommunications Transmission Handbook*. Nova York: Wiley, 1998.

STAL04 Stallings, W. *Data and Computer Communications*, 7ª edição. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.

Web sites recomendados

- **Network Services and Integration Forum:** Examina os produtos, a tecnologia e os padrões atuais da SONET.
- **SONET Home Page:** Links úteis, tutoriais, artigos e FAQs sobre a SONET.

17.8 Principais termos, perguntas para revisão e problemas**Principais termos**

canal TDM
controle de enlace de dados de alto nível (HDLC)
controle de erros
controle de fluxo
hierarquia digital síncrona (SDH)
linha digital de assinante (DSL)

linha digital de assinante assimétrica (ADSL)
multiplexação
multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM)
multiplexação por divisão de comprimento de onda denso (DWDM)
multiplexação por divisão de frequência (FDM)
multiplexação por divisão de tempo (TDM)
multitom discreto (DMT)
protocolo de controle de enlace de dados
quadro
quadro TDM
rede óptica síncrona (SONET)
requisição de repetição automática (ARQ)
TDM síncrona

Perguntas para revisão

- 17.1. Defina *controle de fluxo*.
- 17.2. Defina *controle de erros*.
- 17.3. Cite os itens comuns para o controle de erros em um protocolo de controle de enlace.
- 17.4. Qual é a finalidade do campo Flag no HDLC?
- 17.5. Que tipo de detecção de erros é usado no campo Sequência de Verificação de Quadro do HDLC?
- 17.6. Quais são os três tipos de quadro aceitos pelo HDLC? Descreva cada um deles.
- 17.7. O que é multiplexação?
- 17.8. Como é chamado o conjunto de lacunas de tempo ou a frequência alocada para uma única origem?
- 17.9. Por que a multiplexação é tão econômica?
- 17.10. Como se evita a interferência usando a multiplexação por divisão de frequência?
- 17.11. O que é o cancelamento de eco?
- 17.12. Defina *upstream* e *downstream* com relação às linhas de assinante.
- 17.13. Explique como funciona a multiplexação por divisão de tempo síncrona (TDM síncrona).
- 17.14. Cite alguns dos principais usos das linhas T-1.
- 17.15. Por que o uso das linhas privadas T-1 é tão atraente para as empresas?

Problemas

- 17.1 Suponha que vários enlaces físicos conectam duas estações. Queremos usar um "HDLC multienlace" que use esses enlaces de modo eficiente, enviando quadros em FIFO (o primeiro a entrar é o primeiro a sair) no próximo enlace disponível. Que melhorias no HDLC são necessárias?
- 17.2 Como podemos obter uma velocidade de dados de 56 kbps em 23 canais usando um formato DS-1?
- 17.3 Para ter alguma indicação das demandas relativas do tráfego de voz e dados, observe o seguinte:
 - a. Calcule o número de bits usados para enviar uma chamada telefônica de 3 minutos usando PCM padrão.
 - b. Considerando uma média de 65 caracteres por linha e 55 linhas por página, quantas páginas do texto do IRA correspondem a uma chamada telefônica de 3 minutos?

c. Quantas páginas de fax em resolução padrão – ou seja, 200dpi (pontos por polegada) horizontalmente e 100dpi verticalmente – correspondem a uma chamada telefônica de 3 minutos? Considere que a página efetiva contém 8 polegadas de largura por 10,5 polegadas de altura. Além disso, considere um índice de compactação de 10 para 1.

17.4 Recentemente, foi anunciado um novo scanner que fornecia resolução de 1.200dpi e mais de 1 bilhão de cores.

a. Quanta memória, em bytes, seria necessária para armazenar um mapa de bits de uma fotografia monocromática de 8 polegadas por 10 polegadas em 1.200dpi, com uma escala de cinza de 10 bits?

b. Suponha que as cores são representadas como uma combinação de três – vermelho, azul e verde – cada qual com n bits para representar sua intensidade. Qual é o menor valor de n que fornecerá mais de 1 bilhão de cores?

c. Quanto tempo levaria para enviar uma representação em tons de cinza de uma fotografia de 8×10 polegadas em 1.200dpi por meio de uma linha T-1 (1,544Mbps)?

17.5 Parafraseando Lincoln, todo o canal por pouco tempo, um pouco do canal por todo o tempo. Consulte a Figura 17.5 e relacione essa frase à figura.

17.6 Pense que você precisa projetar uma portadora TDM, digamos, T-489, para aceitar 30 canais de voz usando amostras de 6 bits e uma estrutura semelhante à da linha T-1. Determine a velocidade de bits necessária.

17.7 A TDM estatística (ou assíncrona) é uma alternativa para a TDM síncrona. Descreva em que a STDM é diferente da TDM (síncrona). Quais as vantagens e as desvantagens da STDM?

17.8 As linhas T-3 e OC-3 são alternativas para a linha T-1. Quais são as velocidades de dados máximas para esses dois meios? Descreva um cenário em que cada meio (T-1, T-3 e OC-3) constituiria uma solução ótima. Leve em conta as considerações de capacidade e custo em sua resposta.

ESTUDO DE CASO X: Haukeland University Hospital

O Haukeland University Hospital é um dos maiores hospitais da Noruega. O hospital oferece quase todo tipo de diagnóstico e tratamento médico. O Haukeland University Hospital é o hospital regional para a Western Area Health Region, fornecendo serviços para os 900 mil habitantes da região. Com 200 admissões e 1.000 pacientes de ambulatório por dia, ele é um dos hospitais mais movimentados da Escandinávia. Com seu total de 6.000 funcionários, o hospital também é o maior empregador do oeste da Noruega. Mais de 500 médicos e 2.000 enfermeiros fornecem serviços de saúde diuturnamente a mais de 67.000 pacientes internados e 314.000 pacientes de ambulatório por ano. Com 1.100 leitos, o Haukeland University Hospital é um hospital acadêmico com fortes vínculos com a Universidade de Bergen. A cada ano, 180 médicos residentes recebem seu treinamento clínico no hospital, que também é um importante centro de ensino e treinamento para outros grupos de saúde e outros alunos. No centro de treinamento do próprio hospital, mais de 100 enfermeiros por ano se especializam em tratamento intensivo, anestesia e pediatria. O hospital também oferece ensino especial a 100 especialistas em enfermagem a cada ano.

O Haukeland é o principal membro de uma rede de saúde de centros de tratamento, hospitais locais, instituições psiquiátricas e serviços dentários em todo o sudoeste da Noruega; a rede é conhecida como iHelse.net. A esparsa densidade populacional e o terreno montanhoso fazem dessa região uma candidata ideal para a telemedicina. O hospital reconheceu a necessidade de criar uma rede e uma infra-estrutura de transferência de imagem de modo que a localização não limitasse a disponibilidade de médicos especialistas. Sem essa infra-estrutura, os especialistas precisariam viajar para atender a cada paciente individual, gastando um tempo valioso cruzando toda a região. Assim, um sistema de telemedicina melhora significativamente a produtividade do especialista. Além disso, se os pacientes mudarem de um hospital para outro, seu tratamento não é retardado, pois o hospital escolhido pode acessar imediatamente o histórico médico do paciente, incluindo exames radiológicos anteriores. Finalmente, os médicos que trabalham em qualquer local têm acesso a todos os registros e serviços de informação do hospital central, devido às interconexões de computador.

Fundamental para a estratégia de telemedicina do hospital foi a instalação do sistema Picture Archiving and Communications System (PACS), que pode produzir imagens digitais de radiologia e outros documentos médicos. O PACS exige um considerável espaço de armazenamento e, igualmente importante, o suporte de uma WAN de alta capacidade que pudesse servir a região do hospital [KIRB01].

Quando o Haukeland decidiu desenvolver o PACS, uma parte importante do planejamento foi examinar a infra-estrutura de WAN atual que servia a iHelse.net. Na época, a iHelse.net se baseava em uma rede Frame Relay de 256kbps, ao custo mensal de US\$600 por conexão. A WAN iHelse.net servia 70 locais na região, com 10.000 usuários e mais de 5.000 estações de trabalho. Embora a cobertura da WAN fosse satisfatória para as operações diárias atuais, ela não poderia suportar o PACS. O hospital precisava melhorar consideravelmente a capacidade, e os chefes de projeto concentraram seus esforços iniciais em atualizar a WAN para 10Mbps ou 100Mbps usando Frame Relay ou ATM.