

Compartilhamento de Linhas

- Prover serviço em regiões rurais sempre foi problemático para as companhias telefônicas devido ao elevado custo das longas rotas envolvidas e ao pequeno número de assinantes para suportar o custo da instalação e da manutenção da infraestrutura envolvida.
- No passado, uma forma comum de reduzir este custo era utilizar linhas compartilhadas, o que envolvia o compartilhamento do par telefônico entre múltiplos assinantes.
- Uma linha compartilhada é uma solução útil para prover serviço em rotas em que não há pares de reserva, no entanto é uma solução obviamente indesejável, devido à falta de privacidade e à falta de disponibilidade do serviço a qualquer tempo, devido ao compartilhamento.
- **A solução para este problema surgiu por meio de sistemas concentradores e multiplexadores.**

Sistemas Concentradores

- A primeira abordagem proposta é mostrada na Fig. 3.13 (a).
- Este tipo de sistema provê concentração através do chaveamento de um n° (N) de pontos ativos (linhas telefônicas de usuários ou fontes) em um n° menor de linhas de saída compartilhadas (canais).

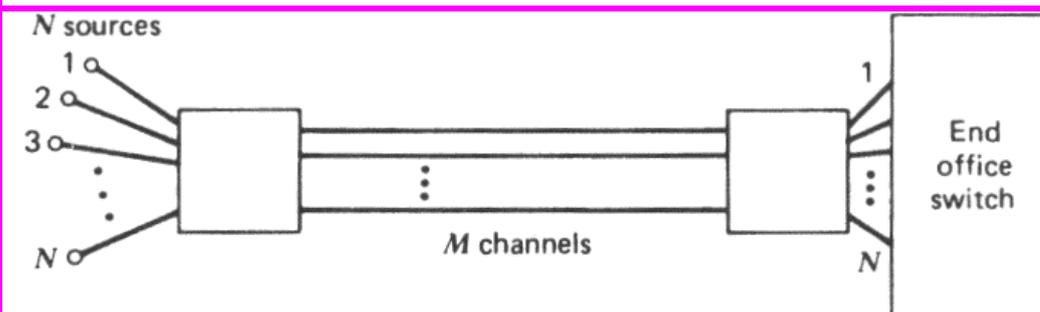


Figura 3.13 (a): Sistema concentrador ($N > M$).

- No outro lado do sistema concentrador ocorre a expansão, através do chaveamento das linhas compartilhadas em entradas individuais da central de comutação local, correspondentes aos N usuários ativos.
- Este modelo permite que o sistema seja operacionalmente transparente para o usuário.
- No entanto, como um sistema concentrador é incapaz de prover conexão para todas as estações ativas que serve (linhas de usuários ou fontes) ao mesmo tempo, um determinado grau de bloqueio é necessariamente introduzido pelo sistema.
- Quando a atividade das fontes é suficientemente baixa, uma razão de concentração significativa pode ser obtida, a aceitáveis probabilidades de bloqueio.
- Por exemplo, 40 estações que são ativas apenas 7.5% do tempo (cada uma delas) podem ser concentradas em 10 linhas, com uma probabilidade de bloqueio de 0.001, que é considerada uma degradação aceitável, quando imposta ao serviço.
- Os dois lados de um sistema concentrador precisam trocar informações de controle. Quando um lado do sistema estabelece uma nova conexão para uma das linhas compartilhadas, o outro lado deve ser informado, para estabelecer a conexão reversa apropriada.

Sistemas Multiplexadores

- A largura de banda inerente a um típico par telefônico é consideravelmente maior do que o necessário para o transporte de um único sinal de voz.
- Por esta razão, pode-se empregar multiplexação para transportar múltiplos canais de voz sobre um único par de fios.
- A Figura 3.13 (b) apresenta a técnica de multiplexação por divisão em frequência (FDM - *Frequency Division Multiplexing*). Outra forma de multiplexação é aquela utilizada em sistemas digitais para sinais de voz, chamada multiplexação por divisão no tempo (TDM - *Time Division Multiplexing*).

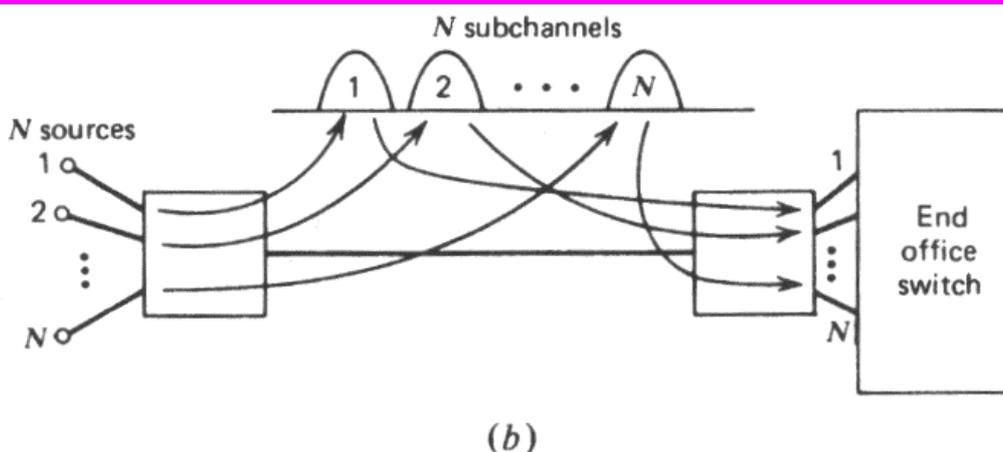


Figura 3.13 (b): Sistema multiplexador.

- Conforme mostra a Figura 3.13 (b), há uma relação de um para um entre a linha do usuário e os sub-canais do multiplexador.
- Neste tipo de sistema não há possibilidade de bloqueio, nem a necessidade de transferência de informação de chaveamento entre os dois lados do sistema.
- No entanto, um problema inerente a este sistema é a possibilidade de sub-canais serem altamente inutilizados se as fontes forem relativamente inativas. Nestas situações, uma combinação de concentração e multiplexação pode ser aconselhável.

Sistemas baseados em *Time Assignment Speech Interpolation*

- *Time Assignment Speech Interpolation* (TASI) é um sistema que atribui dinamicamente um canal a um circuito, somente quando existe atividade de voz.
 - Um sistema TASI sente a atividade de voz de um determinado número de fontes (N), atribui as fontes ativas a um dos M canais disponíveis (M é tipicamente a metade de N), e sinaliza os dois lados do sistema sobre as conexões.
 - Normalmente, cada participante de uma conversação está ativo por apenas 40% do tempo, o que indica que, se $M = N/2$, haverá uma determinada capacidade de reserva para acomodar atividade em excesso em uma direção.
 - Se uma fonte começa a falar quando todos os canais estão utilizados, o começo daquele segmento de fala fica cortado até que um canal se torne disponível.
-
- As aplicações iniciais de sistemas TASI objetivavam a melhora da utilização de cabos sub-aquáticos (o custo elevado dos sistemas sub-aquáticos justificavam o uso de uma técnica de multiplexação um tanto mais complicada).
 - A mesma técnica básica tem sido utilizada em numerosas aplicações de voz digitalizada, tanto para comunicações por satélite quanto para comunicações terrestres.
 - Estes sistemas geralmente são chamados DSI (*Digital Speech Interpolation*).

Multiplexação

- O sistema telefônico utiliza técnicas elaboradas de multiplexação para transmitir mais do que um circuito de voz dentro da largura de banda destinada originalmente a um único circuito.
- O custo de instalação e manutenção de um tronco entre duas centrais telefônicas é o mesmo, independente da banda, por ser decorrente principalmente de outros fatores que não o custo dos cabos de cobre ou de fibras ópticas (licenças para passar cabos em propriedades públicas e privadas, cavar, estender cabos, ...)
- A técnica de multiplexação analógica por divisão em frequência - **FDM (Frequency Division Multiplexing)** tem sido amplamente utilizada em transmissões de rádio, em transmissões por cabos coaxiais e demais sistemas *wired*.
- Uma variação da técnica de multiplexação FDM, chamada **WDM (Wavelength Division Multiplexing)** é utilizada para transmissão por canais de fibra óptica.
- A técnica de multiplexação digital por divisão do tempo - **TDM (Time Division Multiplexing)** é a forma dominante de multiplexação usada em redes telefônicas.

FDM - *Frequency Division Multiplexing*

- Um sistema FDM divide a largura de banda disponível no meio de transmissão em um número de bandas ou sub-canais mais estreitos.
- Para atender ao compromisso de multiplexar o maior número possível de canais de voz em um sistema e manter fidelidade de voz aceitável, as companhias telefônicas estabeleceram inicialmente 4 kHz como a largura de banda padrão de um circuito de voz.
- Atualmente a largura de banda atribuída é 3 kHz por canal de voz. No entanto, quando muitos canais são multiplexados, uma banda de 4 kHz é alocada para cada canal, para mantê-los devidamente separados.
- A Figura 3.14 mostra como três canais telefônicos são multiplexados utilizando a técnica FDM.

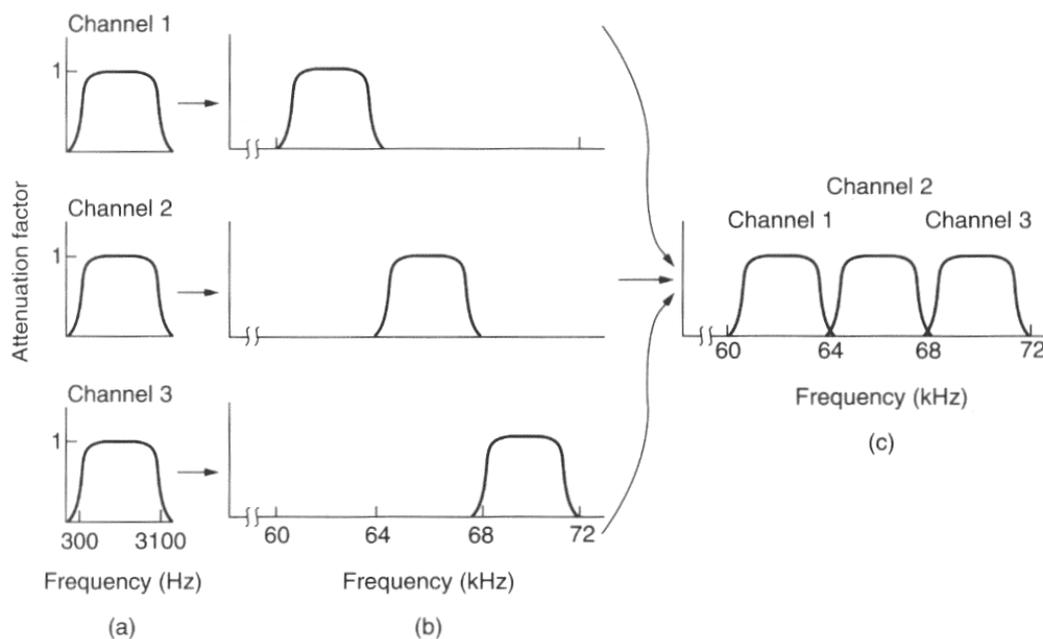


Figura 3.14: Multiplexação por Divisão em Frequência.

(a) Bandas originais. (b) Bandas "levantadas" em frequência.

(c) O canal multiplexado.

- Os canais de voz são deslocados ou "levantados" (*raised*), cada um deles em diferentes frequências.
- Então, os canais são combinados, porque não há dois canais ocupando a mesma porção do espectro.

Hierarquia FDM

Para padronizar os equipamentos de vários sistemas de transmissão das redes analógicas originais, o Sistema Bell estabeleceu uma hierarquia para os esquemas de multiplexação FDM, conforme Tabela 3.1. Por exemplo:

- Um padrão amplamente utilizado conta com 12 canais de voz de 4 kHz (3 kHz para o usuário + 2 bandas de guarda de 500 Hz cada) multiplexados na banda de 60 a 108 kHz. Esta unidade é chamada grupo.
- A banda de 12 a 60 kHz é usada para outro grupo.
- Cinco grupos (60 canais de voz) podem ser multiplexados para formar um super-grupo.
- A próxima unidade constitui um master-grupo, formado por 5 super-grupos ou 10 super-grupos.

Nível de Multiplexação	Nº de Circuitos de Voz	Formação	Banda de Freqüência (kHz)
Canal de Voz	1		0-4
Grupo	12	12 circuitos de voz	60-108
Super-grupo	60	5 grupos	312-552
Master-grupo	600	10 super-grupos	564-3084
Mux Master-grupo	1200-3600	variada	312 ou 564-17548
Jumbo-grupo	3600	6 master-grupos	564-17548
Mux Jumbo-grupo	10800	3 jumbo-grupos	3000-60000

Tabela 3.1: Hierarquia FDM da Rede Bell.

- Cada nível de hierarquia é implementado usando um conjunto de módulos padrão FDM.
- O equipamento de multiplexação é independente do meio de transmissão.
- Todos os equipamentos de multiplexação na hierarquia FDM usam modulação SSB (≈ 4 kHz de bw / circuito de voz).
- O bloco de menor nível hierárquico é um grupo que consiste de 12 canais de voz utilizando, no total, 48 kHz.

- A Figura 3.15 apresenta o diagrama de blocos de um multiplexador de canais A5, o mais comum banco de canais tipo A usado para multiplexação de primeiro nível.

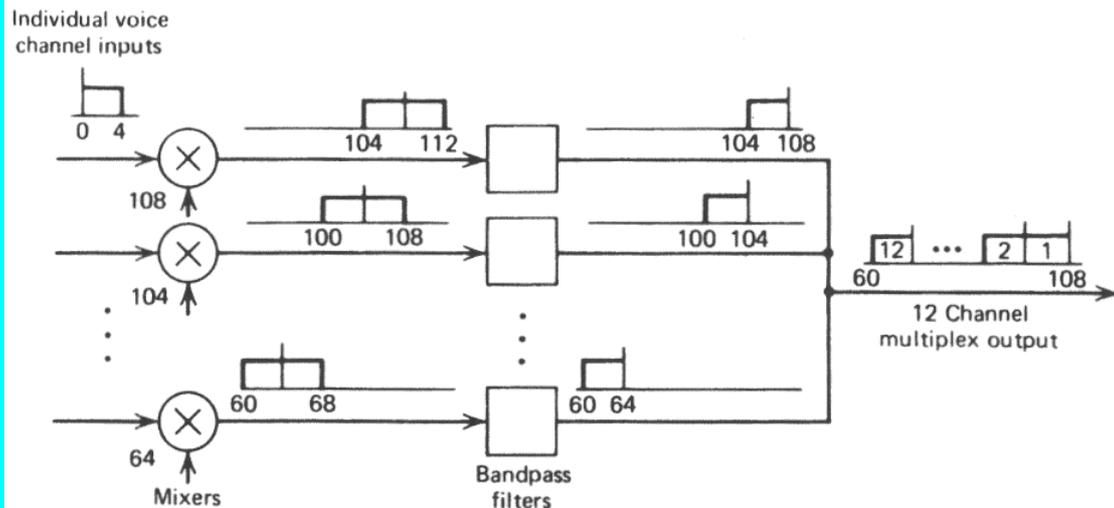


Figura 3.15: Banco de multiplexadores de canais A5.

- Na Figura, são vistos 12 moduladores usando 12 portadoras separadas, gerando 12 sinais *double-sideband*.
- Cada canal é filtrado em banda passante para selecionar apenas a banda lateral inferior de cada sinal *double-sideband*.
- O sinal multiplexado composto é produzido pela superposição das saídas dos filtros.
- Equipamentos demultiplexadores no receptor utilizam o mesmo processamento básico, em ordem reversa.
- Note que um filtro de separação de banda lateral remove a banda lateral superior, restringindo a largura de banda do sinal resultante.
- Estes filtros, portanto, representam um fator básico na rede telefônica analógica, por definirem a largura de banda do circuito de voz.

- De acordo com a Tabela 3.1, um segundo nível de hierarquia FDM é constituído por um multiplexador de 60 canais chamado de super-grupo.
- A Figura 3.16 mostra a implementação básica de um banco LMX que multiplexa 5 grupos de canais de primeiro nível (5×1 grupo = 5×12 circuitos de voz = 240 kHz).

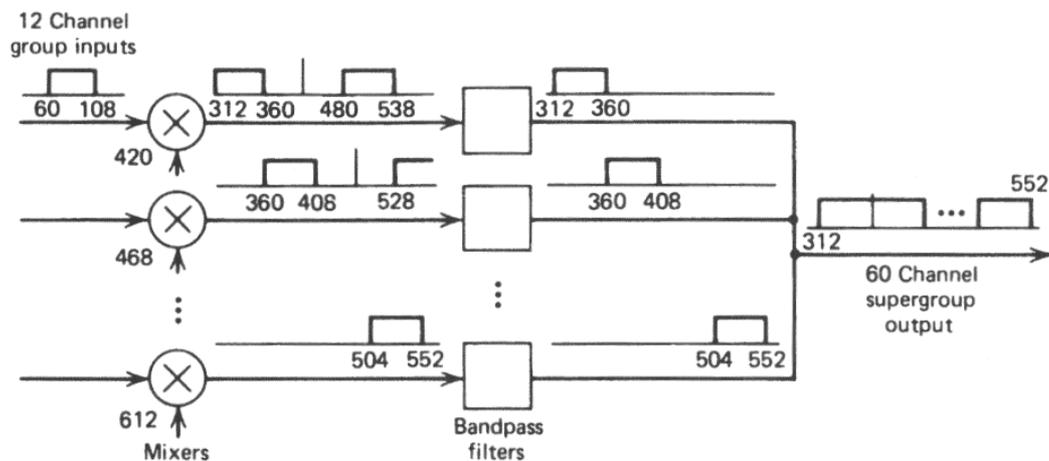


Figura 3.16: Banco de multiplexadores de canais LMX.

- Os 60 canais multiplexados resultantes na saída são idênticos aos obtidos quando os canais são individualmente transladados em bandas de 4 kHz, de 312 a 552 kHz.
- A translação direta requer 60 sistemas SSB separados com 60 portadoras distintas.
- O banco LMX, entretanto, usa apenas 5 sistemas SSB, mais cinco módulos de nível inferior (5 grupos).
- Como um multiplexador de segundo nível agrupa sinais individuais de primeiro nível sem bandas de guarda, as frequência portadoras e os filtros passa-banda no banco de LMX devem ser mantidas de forma acurada.
- Multiplexadores de mais alto nível guardam uma maior distância entre sinais de nível inferior.

WDM - *Wavelength Division Multiplexing*

- Quando a luz se propaga em um tubo de material opticamente transparente ela é guiada pelo tubo e segue a curvatura do tubo.
- Materiais opticamente transparentes são aqueles que permitem a propagação de toda a energia da luz (todos os fótons), sem absorver qualquer porção desta energia.
- Materiais transparentes não causam, portanto, atenuação da potência óptica da luz. Exemplo: vidro transparente.
- Por esta razão, fibras de vidro foram escolhidas para transmissão de comunicações terrestres e submarinas de longa distância, alta velocidade e alta confiabilidade.
- Uma fibra óptica típica consiste de um núcleo de sílica ultrapura misturada com elementos dopantes utilizados para ajustar o índice de refração da sílica e, assim, suas características de propagação da luz.
- Um cabo de fibra óptica é constituído de um único núcleo de fibra (fio) de muitas milhas de comprimento, recoberto por camadas de diferentes materiais para proteção do núcleo (sílica com outros dopantes, plástico...).
- Os cabos usados em transmissão são constituídos de um feixe de fibras ópticas (podendo chegar a ter mais do que 432 fibras).
- Taxas de bits da ordem de mais de 40 Gigabits por segundo são atingidas em uma única fibra.

- Para canais de fibra óptica é utilizada a multiplexação por comprimento de onda, WDM - *Wavelength Division Multiplexing*, que é uma variação da multiplexação por divisão em frequência (FDM).
- Para um número elevado de canais (comprimentos de onda) multiplexados, a técnica WDM é chamada DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*.
- WDM (ou DWDM) é uma tecnologia óptica que acopla muitos comprimentos de onda na mesma fibra, aumentando efetivamente a largura de banda agregada da fibra à soma das taxas de bits de cada comprimento de onda acoplado.

Aplicação potencial da técnica WDM a Sistemas Telefônicos:

- ◆ Uma companhia telefônica pode instalar uma única fibra óptica de uma central local até uma caixa de junção em uma determinada vizinhança, onde é conectada com os pares torcidos vindos das unidades dos usuários.
- ◆ Anos mais tarde, quando o custo da fibra óptica tiver diminuído e a demanda aumentado, os pares torcidos poderão ser substituídos por fibras e todos os *loops* locais unidos à fibra que chega da central local através da técnica WDM.

- A Figura 3.17 descreve de forma simplificada o conceito de multiplexação WDM, em que cada canal representa um cadeia de bits que é transportada sobre um diferente comprimento de onda (λ_i).
- Diferentes canais podem transportar dados a diferentes taxas de bits e pertencentes a diferentes serviços (voz, dados, vídeo, ...).

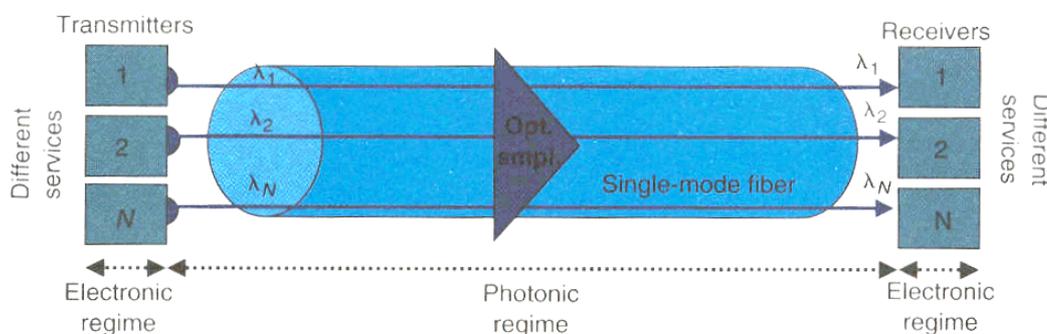
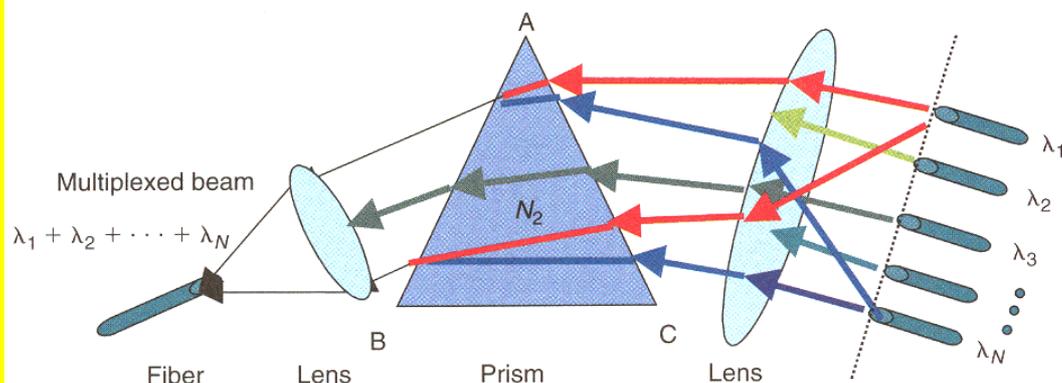


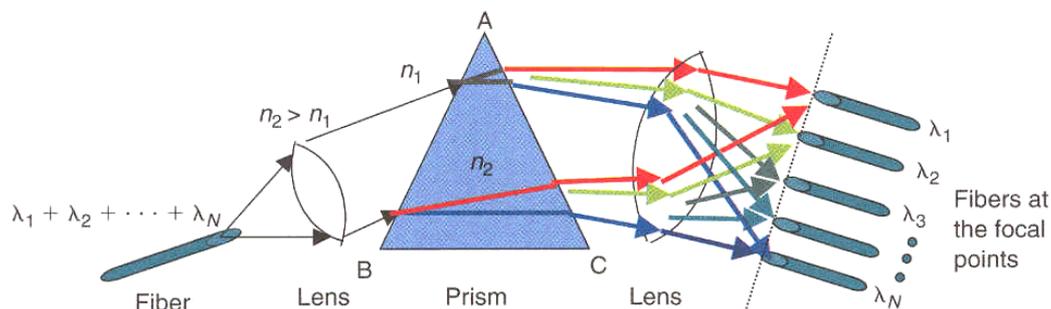
Figura 3.17: Sistema WDM com muitos canais (muitos λ) na mesma fibra.

- Multiplexadores ópticos recebem, na entrada, uma multiplicidade de fibras carregando sinais ópticos de diferentes comprimentos de onda.
- Todos os comprimentos de onda são focados no mesmo ponto focal e são acoplados em uma única fibra de saída.
- A maior parte dos multiplexadores ópticos podem também ser utilizados como demultiplexadores ópticos.
- Nesta categoria encontram-se os prismas e *gratings*, cuja operação como multiplexadores/demultiplexadores é descrita pelas Figuras 3.18 e 3.19, a seguir.

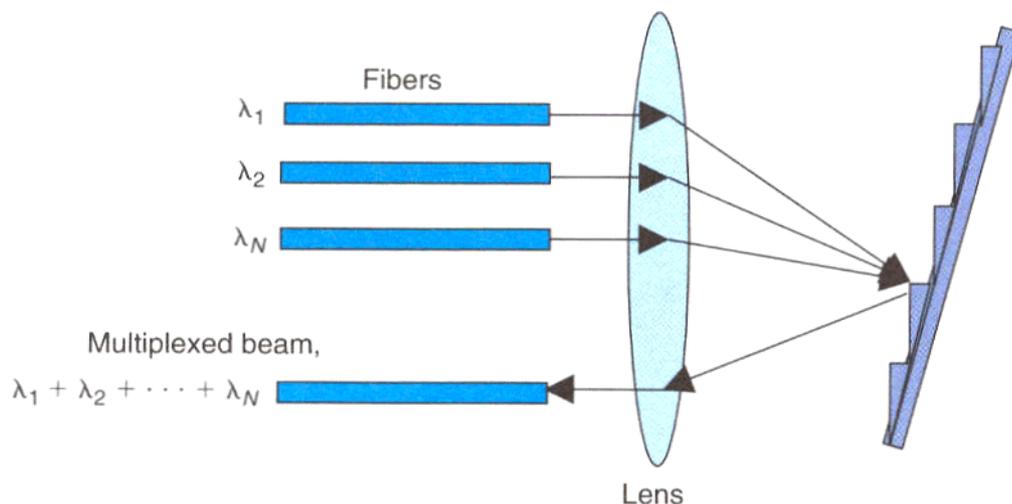
- A Figura 3.18 (a) descreve a utilização de um prisma como multiplexador DWDM.



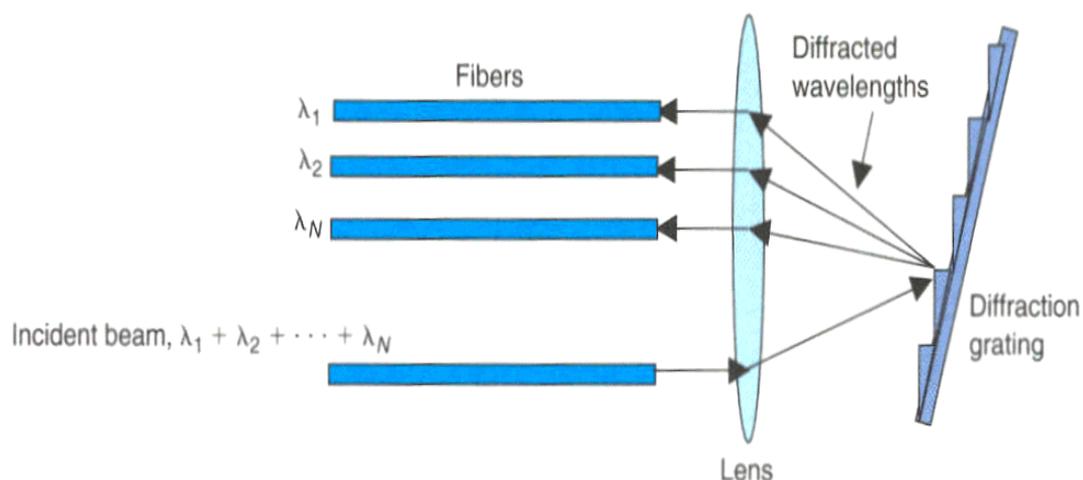
- Na Figura 3.18 (b) um prisma é utilizado para demultiplexar os canais.
- Quando um feixe paralelo de luz policromática colide com uma das superfícies do prisma (AB, na Figura), cada componente de frequência é refratado de forma diferente.
- A luz que sai na outra superfície do prisma (AC, na Figura) consiste dos componentes de frequência separados uns dos outros por um pequeno ângulo.
- Uma lente foca cada comprimento de onda em um diferente ponto onde fibras receptoras são colocadas, uma fibra para cada canal (ou comprimento de onda).



- A Figura 3.19 (a) descreve a utilização de um *grating* como multiplexador DWDM.



- Na Figura 3.19 (b) um *grating* (grade ou retícula) de difração é utilizado para demultiplexar os canais.
- Quando um feixe paralelo de luz policromática colide com um *grating* de difração, cada componente de frequência é difratado e dirigido para um diferente ponto no espaço.
- Uma fibra é colocada nos pontos focais de cada comprimento de onda.
- A focalização dos comprimentos de onda difratados pode ser obtida por meio de um sistema de lentes ou de um *grating* de difração côncavo.



- Com a técnica DWDM, a largura de banda atingida excede um Terabit por segundo.
- Sistemas DWDM práticos podem multiplexar mais do que 128 comprimentos de onda. (Testes realizados provaram ser possível a multiplexação de 206 comprimentos de onda.)
- Um sistema DWDM com 40 comprimentos de onda, a 10 Gigabits por segundo por λ , possui uma banda total de 400 Gbits/s (suficiente p/ transportar em uma única fibra o conteúdo de mais do que 11000 volumes de uma enciclopédia em 1s).
- Sistemas DWDM com 40 Gbits/s por λ já são realizáveis e a tendência continua sendo aumentar tanto a densidade de comprimentos de onda multiplexados, quanto a taxa de bits por comprimento de onda.
- A Figura 3.20 apresenta dados sobre a evolução do crescimento da densidade de comprimentos de onda multiplexados, e da taxa de bits por comprimento de onda.

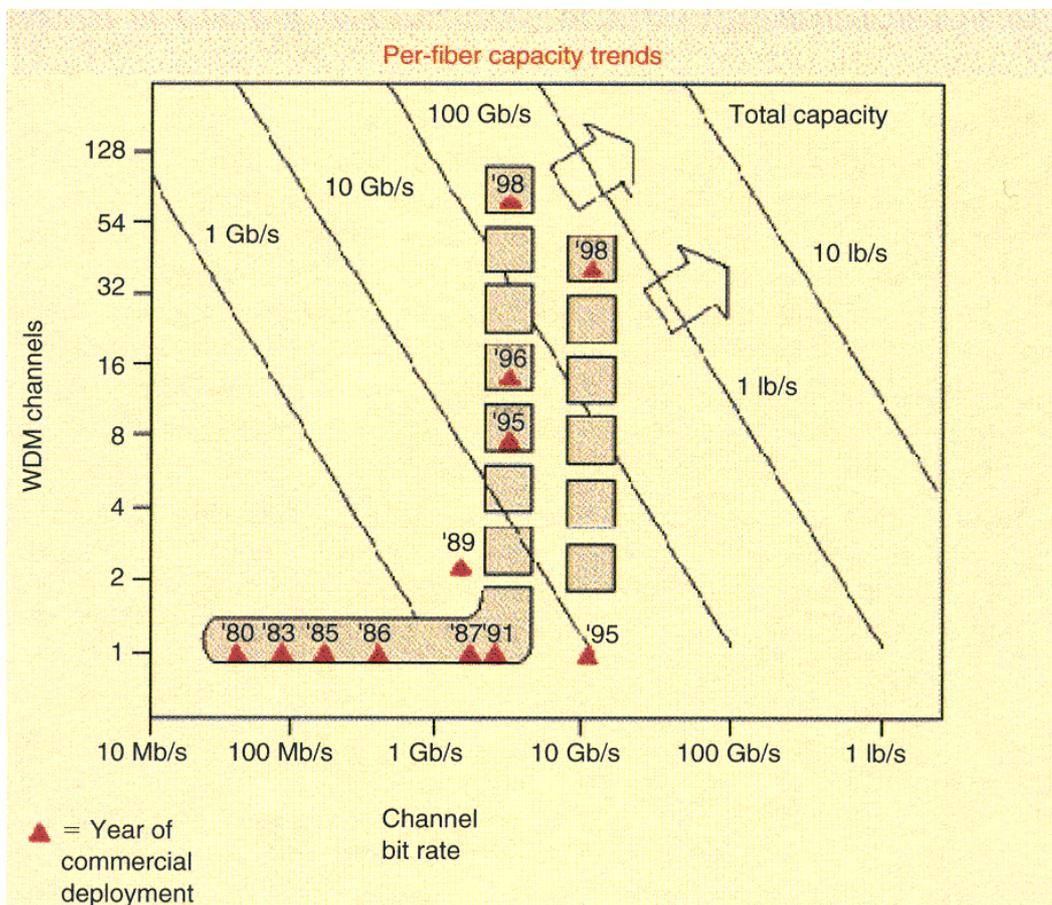


Figura 3.20: Tendência da evolução da capacidade por fibra.

TDM - *Time Division Multiplexing*

- A multiplexação por divisão no tempo envolve o compartilhamento do meio de transmissão pelo estabelecimento de uma seqüência de *slots* de tempo durante os quais fontes individuais podem transmitir sinais.
- A totalidade da banda disponível pode ser utilizada periodicamente por cada fonte, por um intervalo restrito de tempo. (Em contraste com a técnica FDM, em que os sistemas atribuem uma banda restrita a cada fonte por todo o tempo.)
- Normalmente, todos os *slots* de tempo de um sistema TDM são de igual tamanho.
- Usualmente, a cada sub-canal é atribuído um *slot* de tempo com um período de repetição comum, chamado intervalo de *frame*.
- Esta forma de TDM (mostrada na Figura 3.21) é conhecida por TDM Síncrono, para especificar que a cada sub-canal é atribuída uma certa capacidade de transmissão, determinada pela duração do *slot* de tempo e pela taxa de repetição.

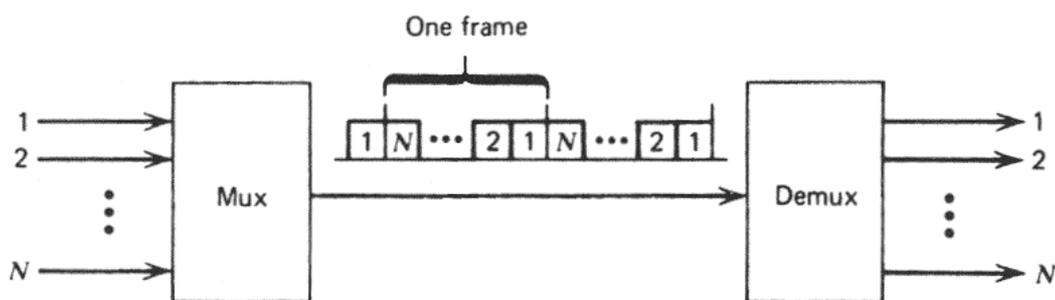


Figura 3.21: Sistema de Multiplexação TDM Síncrono.

- O *backbone* dos *links* digitais da rede pública de telefonia usam uma variedade síncrona de TDM.
- Em uma outra forma de TDM, chamada estatística ou assíncrona, as taxas dos sub-canais podem variar de acordo com as necessidades individuais das fontes.

Sistemas T (*T-Carrier*)

- O tráfego telefônico entre centrais sempre cresce mais rapidamente do que o tráfego local.
- O rápido crescimento causa severas dificuldades para os provedores do sistema telefônico, porque a infraestrutura de transmissão implantada sempre foi projetada para regimes de menor volume de tráfego.
- Conseqüentemente, as companhias telefônica freqüentemente necessitam expandir o número de circuitos entre centrais.
- Os sistemas T (*T-Carrier*) foram inicialmente desenvolvidos como uma forma efetiva (em termos de custo) para transmissão entre centrais:
 - tanto para instalação de novos cabos,
 - quanto para diminuir o tráfego nos cabos sobrecarregados entre centrais.
- Um diagrama de blocos de um sistema T (*T-Carrier*) é mostrado na Figura 3.22.

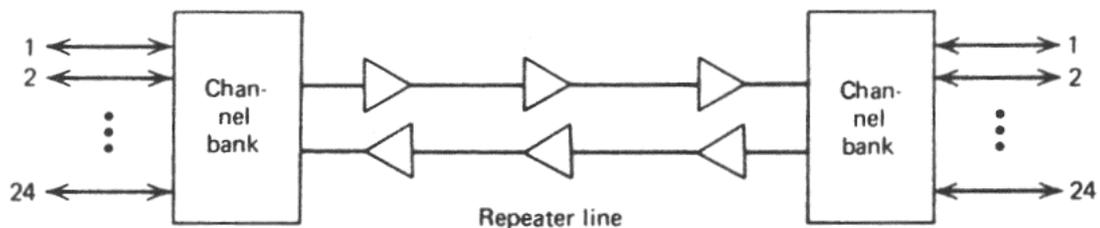


Figura 3.22: Sistema T1 (*T1-Carrier*).

- Uma linha T1 implica na necessidade de converter sinais de voz para o formato digital em um lado da linha e converter de volta a sinais analógicos no outro lado.
- Apesar da necessidade da conversão dos sinais, a conversão e o custo de multiplexação de um terminal TDM digital eram inferiores ao custo de um terminal FDM analógico comparável, fator que justificou sua implantação.

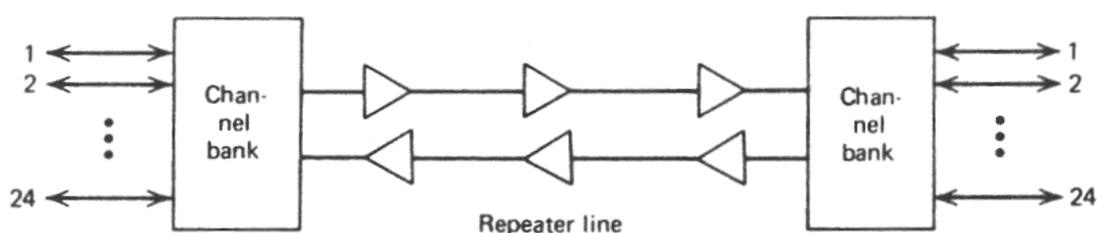


Figura 3.22: Sistema T1 (*T1-Carrier*).

- O primeiro sistema T consistia de equipamentos nos terminais da linha e de um número de repetidores regenerativos em pontos intermediários da linha, como mostra a Figura 3.22.
 - A função de cada repetidor regenerativo é restaurar a seqüência de bits digital (*digital bit stream*) à sua forma original antes que a degradação gerada pela transmissão possa obliterar a identidade dos pulsos digitais.
 - A linha, incluindo os repetidores regenerativos, era referida como uma linha *span* (*span line*).
 - O equipamento original necessário nos terminais era chamado Banco de Canais Tipo-D (D: digital), os quais possuíam numerosas versões.
 - As linhas de transmissão eram pares de condutores, usando cabos com bitolas de 16 AWG a 26 AWG.

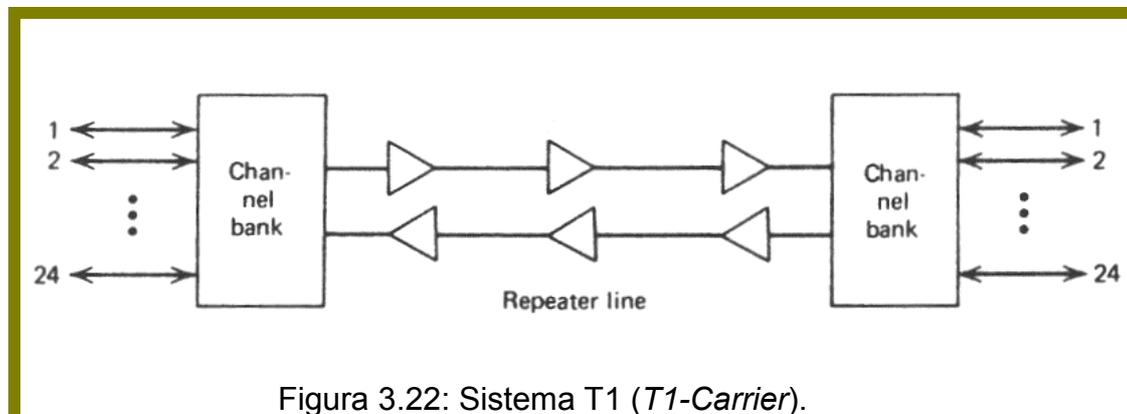


Figura 3.22: Sistema T1 (T1-Carrier).

- O primeiro sistema T1 usava bancos de canais D1A para interfaceamento, conversão e multiplexação de 24 circuitos analógicos.
- Um banco de canais em cada fim de uma linha *span* provia interfaceamento para ambas as direções de transmissão.
- Sinais analógicos recebidos eram multiplexados no tempo e digitalizados para transmissão.
- Quando recebidas no outro lado da linha, as *bit streams* eram decodificadas em amostras analógicas, demultiplexadas e filtradas para reconstruir os sinais originais.
- A cada canal TDM individual eram atribuídos 8 bits por *time slot*. Assim, havia $(24 \text{ circuitos analógicos})(8 \text{ bits por } \textit{time slot})=192$ bits de informação em um *frame*.
- Um bit era adicionado a cada *frame* para identificar os limites do *frame*, totalizando, assim, 193 bits por *frame*.
- Como o intervalo de *frame* é $125 \mu\text{s}$, a taxa básica da linha T1 se torna $\approx 1.5 \text{ Mbps} = (192 \text{ bits/frame}) \times (1 \text{ frame}/125 \mu\text{s})$. Esta taxa de linha foi estabelecida como o padrão fundamental para transmissão digital na América do Norte e no Japão. O padrão é conhecido como DS1 (*Digital Signal 1*).

- Um padrão similar, de ≈ 2 Mbps (2.048 Mbps) foi estabelecido pela ITU-T para o resto dos países.
- Este padrão evoluiu a partir de um sistema parecido com o sistema T1 e provê 32 canais à mesma taxa que os canais americanos.
- O padrão, chamado E1, utiliza apenas 30 canais de voz. Os outros 2 canais são usados para sincronismo de *frame* e sinalização.
- Informações de sinalização e controle para sistemas T1 são inseridas em cada canal de voz.

- Na frequência de um padrão DS1 (frequência central=772 kHz) a atenuação sofrida no percurso demanda o uso de amplificação em pontos intermediários de uma linha T1 *span*.
- Em contraste com um sinal analógico, entretanto, um sinal digital pode não apenas ser amplificado, mas também ser detectado e regenerado. Ou seja, se um pulso pode ser detectado, pode ser restaurado à sua forma original e retransmitido para o próximo segmento de linha.
- Por esta razão, repetidores T1 são ditos regenerativos. As funções básicas destes repetidores são:
 1. Equalização,
 2. Recuperação de *clock*,
 3. Detecção de pulsos e
 4. Transmissão.

- A operação de equalização é requerida porque os cabos introduzem certas distorções (em fase e amplitude) que causam interferência inter-simbólica, se não forem compensadas.
- Recuperação de *clock* é requerida para dois propósitos básicos: estabelecer um sinal de temporização para amostrar os pulsos que são recebidos e transmitir pulsos de saída à mesma taxa de entrada na linha.

- Repetidores regenerativos são normalmente espaçados a cada 6000 ft em uma linha T1 *span*.
 - Uma exceção é que o primeiro repetidor regenerativo está tipicamente espaçado 3000 ft de uma central telefônica, para manter um sinal relativamente forte na presença do ruído impulsivo gerado por dispositivos antigos de chaveamento, que ainda possam estar operando.
- A experiência de operação de sistemas T1 foi tão favorável que os sistemas T foram continuamente atualizados e expandidos.
 - Uma das melhoras iniciais produziram Sistemas T1C que proviam taxas de transmissão superiores sobre cabos de bitola 22 AWG. Uma linha T1C opera a ≈ 3 Mbps (3.152 Mbps) para 48 canais de voz, 2 vezes mais do que sistemas T1.
- Outro nível de transmissão digital se tornou disponível em 1972, quando o sistema T2 foi introduzido.
 - Este sistema foi projetado para conexões em redes *toll*. Em contraste, sistemas T1 foram originalmente projetados somente para transmissão em áreas de troca.
 - O sistema T2 permite 96 canais de voz a distâncias maiores do que 500 milhas.
 - A taxa da linha era ≈ 6 Mbps (6.312 Mbps), a qual é conhecida como padrão DS2.
 - O meio de transmissão consistia de cabos separados para cada direção de transmissão, permitindo usar repetidores espaçados a mais do que 14800 ft, em ambientes de baixo nível de ruído.
 - A emergência de sistemas baseados em fibras ópticas tornou os sistemas T2 baseados em cobre, obsoletos.

Hierarquia TDM

- Analogamente à hierarquia FDM, a AT&T estabeleceu uma hierarquia TDM que se tornou o padrão para a América do Norte.
- Começando com um sinal DS1 como o bloco básico de construção, todos os outros níveis hierárquicos são implementados como uma combinação de algum número de sinais de nível mais baixo.
- A designação dos multiplexadores digitais de alto nível refletem os respectivos níveis de entrada e saída.
- Por exemplo, um multiplexador M12 combina quatro sinais DS1 para formar um único sinal DS2.
- A Tabela 3.2 lista os vários níveis de multiplexação, suas taxas de bits, e o meio de transmissão usado por cada nível.

Nº do Sinal Digital	Nº de Circs. de Voz	Designação do Multiplexador	Taxa de Bits (Mbps)	Meio de Transmissão
DS1	24	Banco de canais D (24 entradas analógicas)	1.544	Pares de cabos T1
DS1C	48	M1C (2 entradas DS1)	3.152	Pares de cabos T1C
DS2	96	M12 (4 entradas DS1)	6.312	Pares de cabos T2
DS3	672	M13 (28 entradas DS1)	44.736	Rádio, Fibra
DS4	4032	M34 (6 entradas DS3)	274.176	T4M coaxial, Onda guiada, Rádio.

Tabela 3.2: Sinais TDM Digitais Americanos e Japoneses.

- Note que a taxa de bits de um sinal multiplexado de nível mais alto é levemente superior do que taxas combinadas das entradas de níveis inferiores. Os bits excedentes são incluídos para funções de controle e sincronismo.

- Uma hierarquia digital similar foi estabelecida pelo ITU-T (*International Telecommunications Union - Telecommunications Standardization Sector*) como padrão internacional.
- Esta hierarquia (mostrada na Tabela 3.3) é similar ao padrão norte americano, mas envolve números diferentes de circuitos de voz, em todos os níveis.

Nº do Nível	Nº de Circuitos de Voz	Designação do Multiplexador	Taxa de Bits (Mbps)
E1	30		2.048
E2	120	M12	8.448
E3	480	M23	34.368
E4	1920	M34	139.264
E5	7680	M45	565.148

Tabela 3.3: Hierarquia Digital ITU.

A Figura 3.23 mostra um exemplo de multiplexação de seqüências T1 em sistemas T de hierarquia superior.

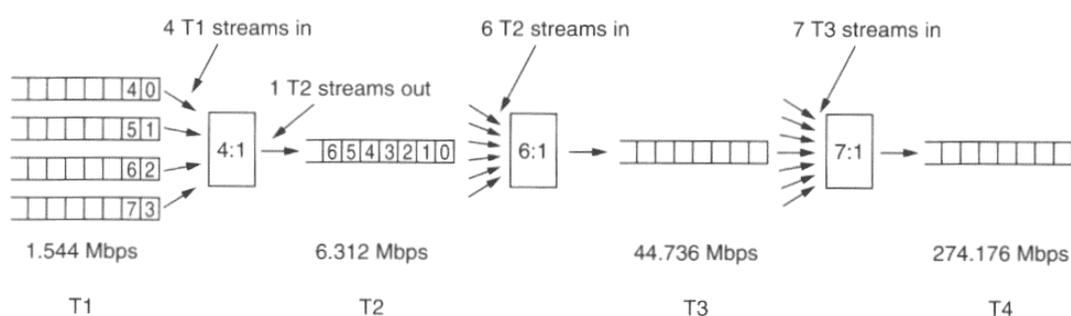


Figura 3.23: Multiplexação de sistemas T1 em sistemas de hierarquia superior.

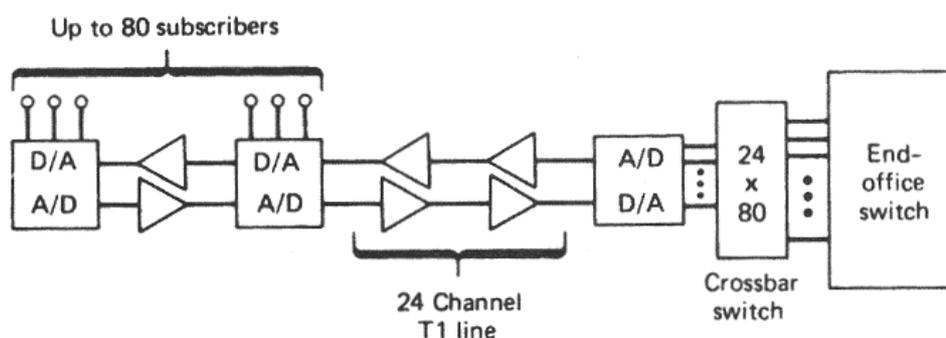
- ⇒ Sistemas TDM permitem a multiplexação de múltiplos sistemas T1 em sistemas hierárquicos de ordem superior.
- ⇒ À esquerda vemos 4 canais T1 sendo multiplexados em um canal T2.
- ⇒ A multiplexação no nível hierárquico T2 e em níveis superiores é realizada bit a bit, e não byte a byte com os 24 canais de voz que constituem um *frame* T1.
- ⇒ Quatro seqüências T1 a 1.544 Mbps deveriam gerar 6.176 Mbps, no entanto, geram 6.312 Mbps. Os bits extra são usados para funções de controle.
- ⇒ No próximo nível, 6 seqüências T2 são combinadas bit a bit para formar uma seqüência T3.
- ⇒ No próximo nível, 7 seqüências T3 são reunidas para formar uma seqüência T4.
- ⇒ A cada passo, uma pequena quantidade de *overhead* é adicionada para compor e recuperar *frames*.

Sistemas Digitais com Compartilhamento de Linhas

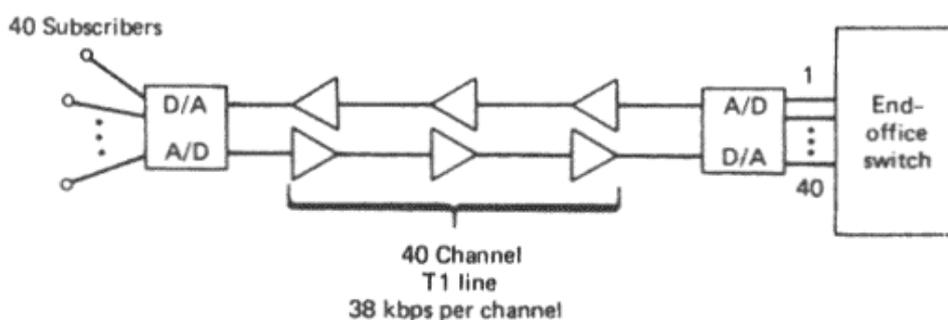
- Seguindo o sucesso da introdução de sistemas T1 para circuitos tronco entre centrais, a maior parte dos fabricantes de equipamentos para telefonia desenvolveram sistemas TDM digitais para distribuição local.
- Estes sistemas são aplicáveis a longos *loops* rurais, onde o custo dos equipamentos eletrônicos envolvidos é compensado pela economia nos cabos.
- Não importa qual seja a distância, para atender a um crescimento inesperado através do compartilhamento de linhas, é mais econômico adicionar dispositivos eletrônicos, ao invés de substituir ou acrescentar novos cabos.

Primeiros sistemas digitais com compartilhamento de linhas usados no sistema Bell:

- Sistema *Subscriber Loop Multiplex* (SLM), mostrado na Figura 3.24.
- Sistema *Subscriber Loop Carrier* (SLC-40), mostrado na Figura 3.25.



- Figura 3.24: *Subscriber Loop Multiplexer* (SLM).
- O sistema SLM provê tanto concentração quanto multiplexação (80 assinantes para 24 canais).



- Figura 3.25: *Subscriber Loop Carrier* (SLC-40).
 - O sistema SLC-40 é estritamente um multiplexador (40 assinantes atribuídos em uma forma um-a-um para 40 canais).
- ◆ Embora estes sistemas usassem uma forma de digitalização de voz (Modulação Delta - DM) diferente daquela que foi usada em sistemas T (*Pulse Code Modulation* - PCM), ambos usavam repetidores padrão T1 para transmissão digital a 1.544 Mbps.
 - ◆ Ambos os sistemas convertiam sinais de voz digitalizada em sinais analógicos por meio de interfaces analógicas individuais, na central de comutação local.

- ◆ A Modulação Delta foi escolhida para codificação nos sistemas SLM e SLC-40 por ser mais simples do que a técnica PCM (que é usada em sistemas T1), sendo, portanto, uma tecnologia de implementação mais barata, especialmente para implementação em sistemas modulares, onde se requer um codificador e um decodificador por canal.
- ◆ Os sistemas originais T1, por outro lado, minimizaram o custo da "eletrônica" envolvida através do uso de codificadores e decodificadores comuns (codecs).
- ◆ No final dos anos 70, se tornaram acessíveis implementações de baixo custo (por meio de circuitos integrados) de modulação PCM, o que conduziu à 1ª implementação do sistema SLC-96, um sistema que utiliza codificação de voz compatível com sistemas T1.
- ◆ O sistema SLC-96 (equivalente funcionalmente a 4 linhas T1) pode interfacear diretamente com uma central local digital e não necessita ser demultiplexado em 24 interfaces analógicas distintas. Esta capacidade é referida como *Integrated Digital Loop Carrier* (IDLC).

SONET/SDH

- ◆ No começo da utilização de fibras ópticas, cada companhia telefônica tinha seu próprio sistema óptico TDM, o que conduziu à necessidade de padronização.
- ◆ Em 1985 o Bellcore iniciou a elaboração de um padrão, chamado SONET (*Synchronous Optical **NET**work*).
- ◆ Mais tarde, o CCITT (*Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique*) juntou-se ao esforço, resultando em um padrão SONET e em um conjunto de recomendações CCITT paralelas (G.707, G.708 e G.709), em 1989.
- ◆ As recomendações CCITT são chamadas SDH (*Synchronous Digital **Hierarchy***), mas diferem muito pouco do padrão SONET.
- ◆ Praticamente todo o tráfego telefônico de longa distância nos USA utiliza o padrão SONET na camada física.

O projeto SONET tinha quatro objetivos principais:

1. Tornar possível a operação entre diferentes sistemas. Para isso, tornava-se necessário definir um padrão de sinalização comum com respeito à comprimento de onda, temporização, estrutura de *frame*, etc.
 2. Unificar os sistemas digitais Americano, Europeu e Japonês, todos os quais eram baseados em canais PCM de 64 kbps, mas combinados de formas diferentes e incompatíveis.
 3. Prover uma forma de multiplexar múltiplos canais digitais. Quando o padrão SONET estava sendo idealizado, o sistema digital de maior velocidade mais amplamente utilizado nos USA era o sistema T3, a 44.736 Mbps. O sistema T4 estava definido, mas ainda pouco utilizado. Parte da missão do padrão SONET era expandir a hierarquia para Gigabits/s ou mais. Uma forma padrão para multiplexar canais mais lentos em um canal SONET também era necessária.
 4. Prover suporte para operação, administração e manutenção. (Os sistemas anteriores não desempenhavam adequadamente estas tarefas.)
- A decisão inicial era fazer do padrão SONET um sistema TDM tradicional, com a banda toda da fibra devotada a um canal contendo *time slots* para os vários sub-canais.
 - Projetado desta forma, o padrão constituiria um sistema síncrono, em que os bits em uma linha SONET são enviados a intervalos de tempo muito precisos, controlados por *clocks* extremamente precisos.
 - Mais tarde quando o chaveamento por célula foi proposto como a base para um sistema ISDN de banda larga, o conceito de operação assíncrona foi estabelecido.
 - Neste conceito, são permitidos intervalos irregulares para o envio das células (como em ATM, por exemplo).

Um sistema SONET consiste de chaves, multiplexadores e repetidores, todos conectados por fibra.

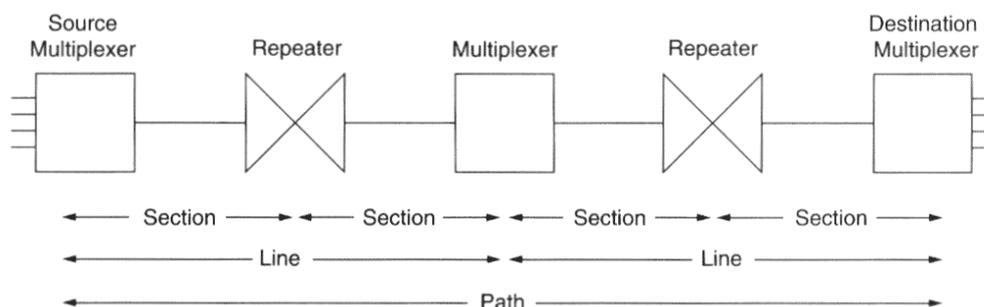


Figura 3.26: Um caminho **SONET**.

- ◆ A Figura 3.26 mostra um caminho **fonte - destino** com um multiplexador intermediário e repetidores intermediários.
 - ◆ Na terminologia **SONET**, uma fibra indo diretamente de qualquer dispositivo a qualquer outro dispositivo, com nada entre eles é chamada **seção**.
 - ◆ Um caminho entre dois multiplexadores (possivelmente com um ou mais repetidores no meio) é chamado **linha**.
 - ◆ A conexão entre a fonte e o destino (possivelmente com um ou mais multiplexadores e repetidores) é chamada **caminho**.
-
- ◆ A topologia SONET pode ser uma malha, mas é freqüentemente um anel duplo (*dual ring*).
 - ◆ Um *frame* básico SONET é um bloco de 810 bytes enviados a cada 125 μ s.
 - ◆ Como a tecnologia SONET é síncrona, *frames* são emitidos caso haja ou não haja conteúdo útil para ser enviado, a uma taxa de 8000 *frames/s*.

- Os *frames* SONET de 810 bytes são melhor descritos como um retângulo de bytes, de 90 colunas por 9 linhas, conforme mostrado na Figura 3.27.
- Assim, $8 \times 810 = 6480$ bits são transmitidos 8000 vezes por segundo, para uma taxa total de dados de 51.84 Mbps.
- Este é o canal básico SONET e é chamado STS-1 (*Synchronous Transport Signal-1*).
- Todos os troncos SONET são um múltiplo do canal básico STS-1.

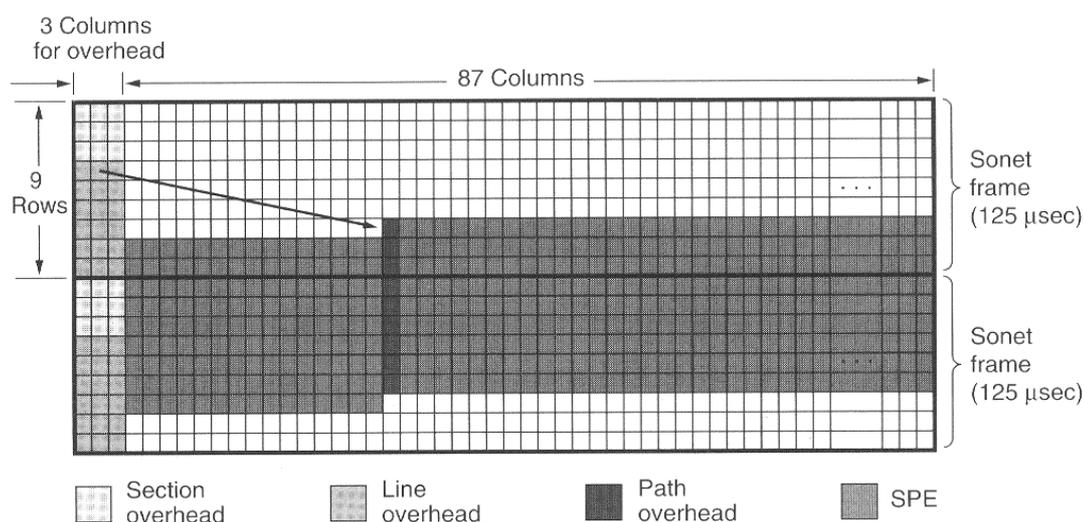


Figura 3.27: Dois *frames* SONET.

- As primeiras três colunas de cada *frame* são reservadas para informação de gerenciamento do sistema, conforme ilustrado na Figura 3.27.
- As primeiras três linhas contêm o cabeçalho da seção; as próximas seis contêm o cabeçalho de linha.
- O cabeçalho de seção é gerado e verificado no começo e no final de cada seção, ao passo que o *overhead* de linha é gerado e verificado no começo e no final de cada linha.
- As restantes 87 colunas contêm $87 \times 9 \times 8 \times 8000 = 50.112$ Mbps de dados do usuário.

- Entretanto, os dados do usuário, chamados SPE (*Synchronous Payload Envelope*) nem sempre começam na linha 1, coluna 4.
- O SPE pode começar em qualquer lugar dentro do *frame*.
- Um ponteiro para o primeiro byte é contido na primeira linha do cabeçalho de linha.
- A primeira coluna do SPE é o *overhead* do caminho.
- A habilidade do SPE em poder começar em qualquer lugar dentro do *frame* SONET, e mesmo criar dois *frames*, como mostrado na Figura 3.27, proporciona flexibilidade extra ao sistema.
- Por exemplo, se uma *payload* chega na fonte enquanto um *frame* SONET está sendo construído, ela pode ser inserida no *frame* corrente, ao invés de esperar até o começo do próximo.
- Esta característica também é útil quando a *payload* não cabe exatamente em um *frame*, como no caso de uma seqüência ATM, com células de 53 bytes. A primeira linha do cabeçalho de linha pode então apontar para o começo da primeira célula completa, para prover sincronismo.
- Os *overheads* de seção, linha e caminho contêm uma profusão de bytes usados para operação, administração e manutenção (são usados para *framing*, paridade, monitoramento de erros, IDs, *clocking*, sincronismo e outras funções).

- A multiplexação de várias seqüências de dados – chamadas tributários – é uma característica importante no padrão SONET. A multiplexação é mostrada na Figura 3.28.

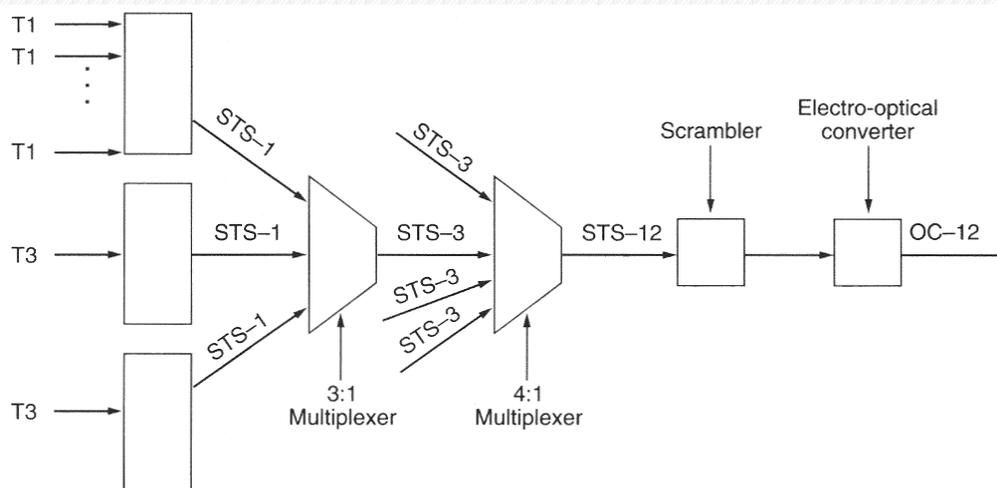


Figura 3.28: Multiplexação no padrão SONET.

- À esquerda vemos várias seqüências de entrada de baixa velocidade, as quais são convertidas para a taxa básica SONET STS-1 (na maior parte dos casos sendo preenchidas visando o arredondamento para 51.84 Mbps).
- A seguir, três tributários STS-1 são multiplexados em uma saída STS-3 de tamanho de seqüência 155.52 Mbps.
- Esta seqüência de dados, por sua vez, é multiplexada em uma saída final que tem 12 vezes a capacidade da seqüência STS-1.
- Neste ponto o sinal é embaralhado e é convertido de sinal elétrico para sinal óptico.
- A multiplexação é feita byte por byte. Por exemplo, quando 3 tributários STS-1 a 51.84Mbps são multiplexados em seqüências STS-3 de 155.52 Mbps, o multiplexador primeiro entrega 1 byte do tributário 1, então 1 byte do tributário 2, e finalmente 1 do tributário 3, antes de voltar para o tributário 1.
- A Figura análoga STS-3, equivalente à Figura 3.28 mostra, da esquerda para a direita, colunas de tributários 1, 2 e 3, nesta ordem, seguida de outra coluna de tributários 1, 2 e 3 e assim por diante, até a coluna 270.
- Um destes *frames* de 270 x 9 bytes é enviado a cada 125 μ s, equivalendo a uma taxa de dados de 155.52 Mbps.

- A hierarquia de multiplexação SONET é mostrada na Tabela 3.4. São definidas taxas para padrões STS-1 a STS-48.

SONET		SDH	Taxa de Dados (Mbps)		
Elétrico	Óptico	Óptico	Total	SPE	Usuário
STS-1	OC-1		51.84	50.112	49.536
STS-3	OC-3	STM-1	155.52	150.336	148.608
STS-9	OC-9	STM-3	466.56	451.008	445.824
STS-12	OC-12	STM-4	622.08	601.344	594.432
STS-18	OC-18	STM-6	933.12	902.016	891.648
STS-24	OC-24	STM-8	1244.16	1202.688	1188.864
STS-36	OC-36	STM-12	1866.24	1804.032	1783.296
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32	2405.376	2377.728

Tabela 3.4: Hierarquia de multiplexação SONET.

- A portadora ótica correspondente à STS-*n* SONET é chamada OC-*n* pelo padrão SDH.
- Os nomes SDH são diferentes, e começam em OC-3 porque os sistemas baseados na CCITT não têm uma taxa próxima de 51.84 Mbps.
- A portadora OC-9 está presente porque se aproxima muito da velocidade dos troncos de maior velocidade usados no Japão. OC-18 e OC-36 serão usados no Japão no futuro.
- A taxa de dados total inclui todo cabeçalho.
- A taxa de dados SPE exclui o cabeçalho de linha e de seção.
- A taxa do usuário exclui todo o cabeçalho e somente conta as 86 colunas disponíveis para a *payload*.

Quando uma portadora, por exemplo, OC-3 não é multiplexada, mas transporta dados de apenas uma única fonte, a letra *c* (que significa concatenado) é adicionada à designação.

Assim, OC-3 indica uma portadora de 155.52 Mbps, consistindo de 3 portadoras OC-1 separadas, mas OC-3c indica uma seqüência de dados de uma única fonte a 155.52 Mbps.

As 3 seqüências OC-1 dentro de uma seqüência OC-3c são intercaladas por colunas, primeiro a coluna 1 da seqüência 1, depois a coluna 1 da seqüência 2, depois a coluna 1 da seqüência 3, seguida pela coluna 2 da seqüência 1, e assim por diante, conduzindo a um *frame* de 270 colunas por 9 linhas.

A quantidade de dados do usuário em uma seqüência OC-3c, é levemente superior à quantidade de dados em uma seqüência OC-3 (149.760 Mbps versus 148.608 Mbps) porque a coluna de cabeçalho de caminho é incluída apenas dentro do SPE, ao invés das 3 vezes que seria incluída, no caso de 3 seqüências OC-1 independentes.

Em outras palavras, 260 das 270 colunas são disponíveis para dados do usuário no OC-3c, enquanto apenas 258 colunas são disponíveis para dados do usuário no OC-3.

Frames concatenados de ordem superior (por exemplo: OC-12c) também existem.

A camada física SONET é dividida em 4 sub-camadas, como mostrado na Figura 3.29.

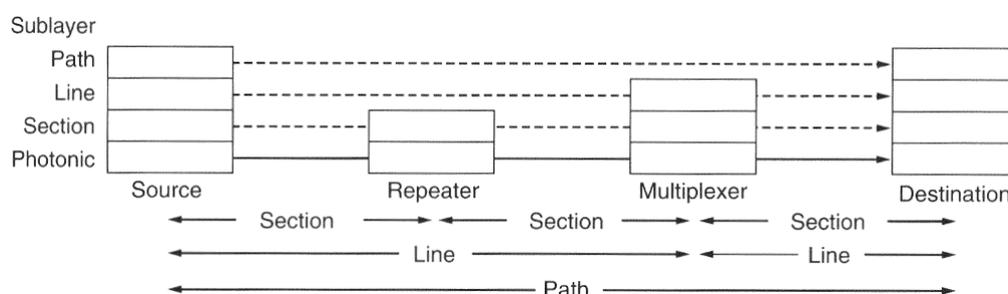


Figura 3.29: Arquitetura SONET.

A **sub-camada inferior** é a sub-camada fotônica, que especifica as propriedades físicas da luz e da fibra, a serem utilizadas.

As 3 sub-camadas remanescentes correspondem às seções, linhas e caminhos.

A **sub-camada de seção** lida com uma única fibra ponto-a-ponto, gerando um *frame* padrão em um lado e processando-o no outro.

Seções podem começar e terminar em repetidores, os quais apenas amplificam e regeneram os bits.

A **sub-camada de linha** é dedicada a multiplexar tributários múltiplos em uma linha e a demultiplexá-los no outro lado.

Para a sub-camada de linha, os repetidores são transparentes.

Quando um multiplexador entrega bits sobre uma fibra, espera-se que os bits cheguem no próximo multiplexador inalterados, não importa quantos repetidores sejam usados no caminho.

O protocolo na sub-camada de linha é estabelecido entre 2 multiplexadores e lida com aspectos tais como: quantas entradas estão sendo multiplexadas e de que forma.

Em contraste, a **sub-camada de caminho** lida com aspectos fim-a-fim.

Evolução das Redes Digitais

A evolução da rede telefônica, de analógica à totalmente digital (exceto pelas linhas de acesso) é sumariada na Figura 3.30.

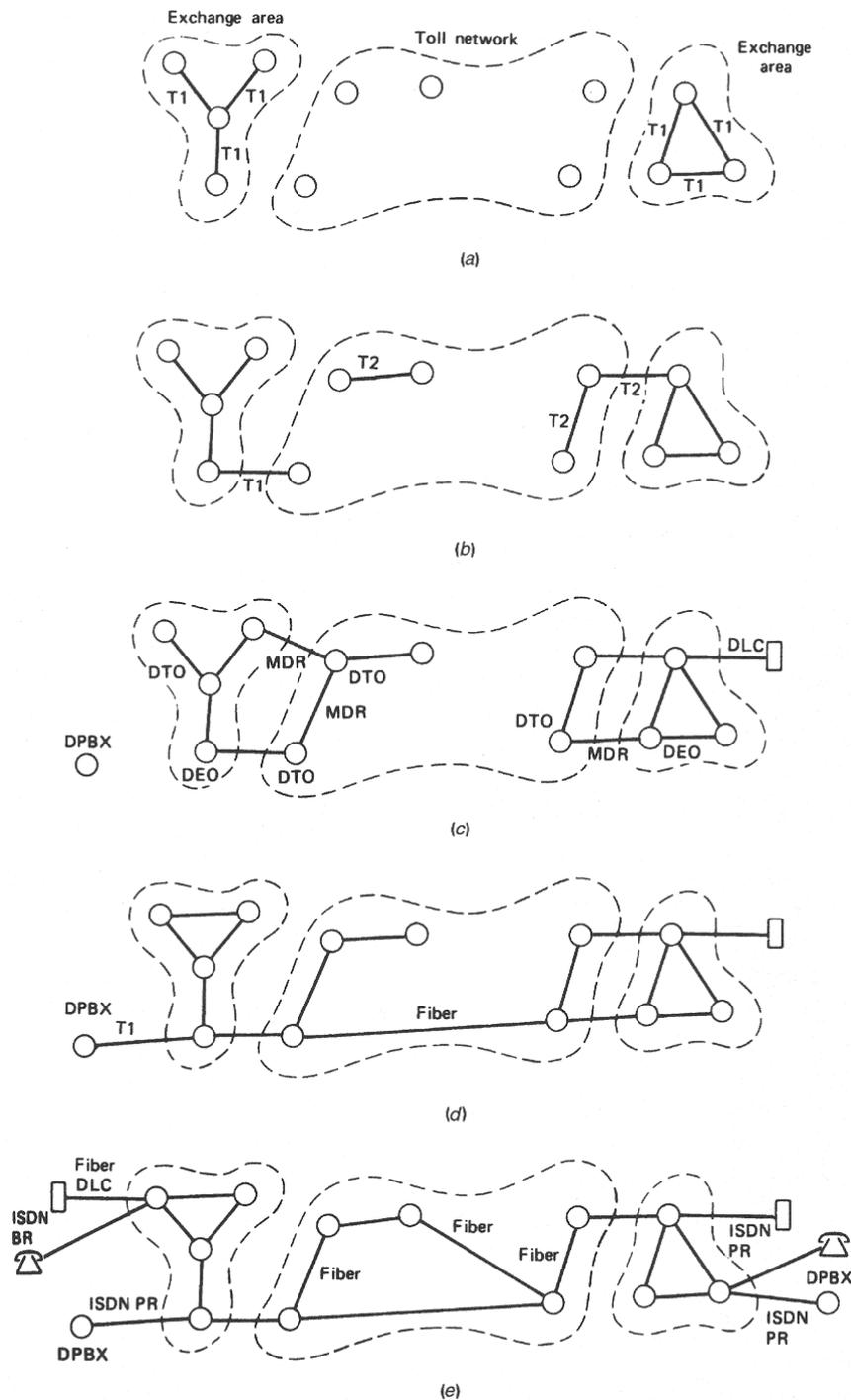
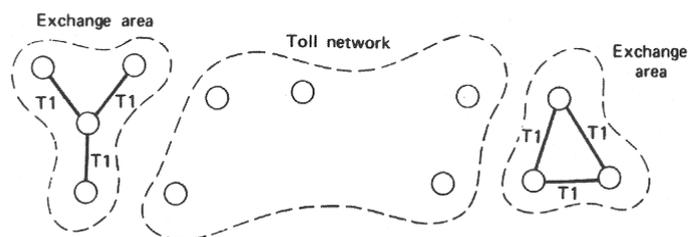
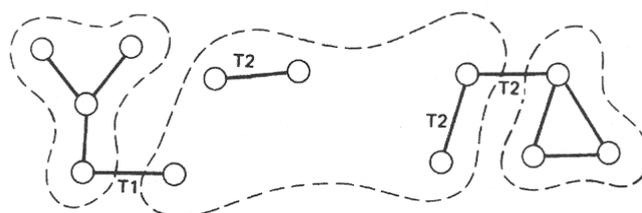


Figura 3.30: Evolução da Rede Digital.



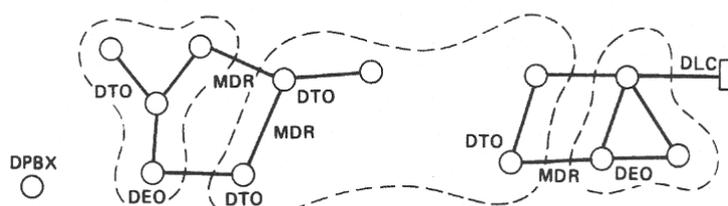
(a)

(a) O processo começou em 1960 com sistemas T1 sendo instalados em troncos relativamente curtos entre centrais dentro de áreas de troca.



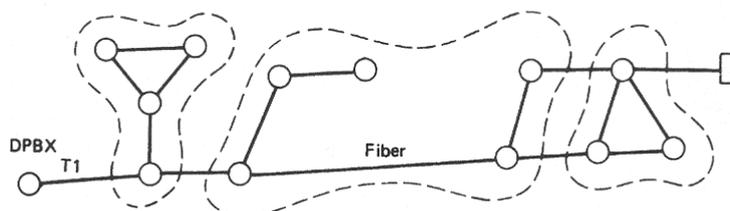
(b)

(b) No início dos anos 70, a transmissão digital foi introduzida nas redes *toll* com sistemas T2 para rotas relativamente curtas entre centrais *toll*.



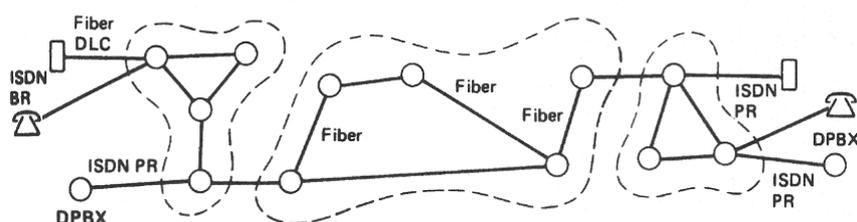
(c)

(c) No final dos anos 70 a digitalização efetivamente começou a se firmar. A cobertura T1 sofreu grande expansão, sistemas DLC (*Digital Loop Carrier*) começaram a ser utilizados e chaves digitais se tornaram disponíveis em todos os níveis da rede (PBXs, centrais locais, centrais *tandem* e centrais *toll*). Além disso, rádios digitais por microondas provaram ser vantajosos para usar tanto nas áreas de troca nas rotas de redes *toll* mais curtas devido aos baixos custos de interface para chaves digitais. Os anos 70 produziram um grande número de ilhas integradas onde chaves digitais dentro de uma região eram inteconectadas por *links* de transmissão digital, mas havia pouca conectividade digital entre as ilhas.



(d)

(d) Uma rede digital completamente integrada e interconectada se tornou realidade no começo dos anos 80, quando a transmissão por fibras ópticas emergiu como a tecnologia para rotas de alta densidade.



(e)

(e) Conectividade digital fim-a-fim para serviços de voz e dados se tornou uma realidade no final dos anos 80, com a introdução das conexões digitais para o usuário de taxa ISDN básica (ISDN BR, 2B+D) e de taxa ISDN primária (ISDN PR, 23B + D). Em adição, as tecnologias de fibra se tornaram muito mais onipresentes à medida que sistemas de taxa DS3 eliminaram sistemas T2 na rede *toll* e os sistemas baseados em fibras se tornaram a tecnologia preferida.