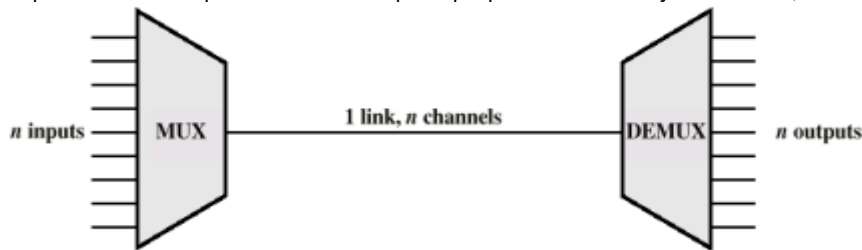


MULTIPLEXAÇÃO

No processo de transmissão de dados o ideal é que as partes comunicantes consigam fazer uso de toda a capacidade de transmissão que o meio possa disponibilizar. Nesse sentido, toda a teoria de controle de fluxo, formação de quadros e controle de erros existe considerando as limitações do meio físico e as suas capacidades de transmissão. No caso de uma comunicação ponto-a-ponto, por exemplo, o desejável é que o transmissor envie o máximo número de quadros possível para o receptor de tal maneira que a capacidade de transmissão do meio seja bem aproveitada.

No entanto, é provado que, em muitos casos, mesmo que as partes comunicantes atuem no máximo de suas capacidades, o meio de transmissão fica ainda sub-utilizado. Existem situações clássicas onde, por mais que o meio de transmissão seja veloz, as partes comunicantes possuem uma limitação no uso desses recursos. É o caso, por exemplo, dos terminais e microcomputadores que podem funcionar razoavelmente bem numa transmissão remota a taxas girando na faixa entre 9,6Kbps e 64kpbs. Por outro lado, é sabido que o custo do meio de transmissão cresce proporcionalmente com a capacidade de transmissão desse meio. Uma forma de redução desse custo é compartilhar ou multiplexar esse meio por vários usuários para que possa haver redução de custos, como mostra a fig. Abaixo:



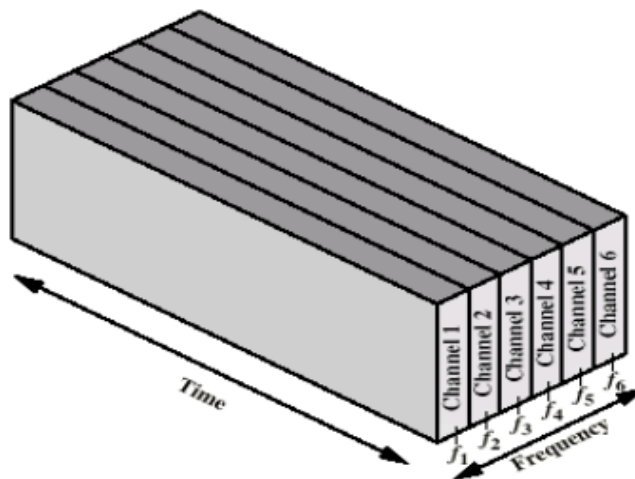
Dentro dessa visão existem três tipos de técnicas de multiplexação. A primeira, multiplexação por divisão de frequência (FDM), é a mais utilizada e é bastante familiar a quem costuma ver televisão ou ouvir rádio. A segunda técnica é um caso particular de multiplexação por divisão de tempo (TDM), conhecido como TDM síncrono. Essa técnica é normalmente utilizada para multiplexar sinais de voz digitalizados em conjunto com textos digitais. A terceira técnica visa aumentar a eficiência do TDM síncrono por adicionar complexidade ao multiplexador e é conhecido mais comumente como TDM Estatístico. As seções que se seguem, abordam cada um desses métodos.

1. FDM – Multiplexação por Divisão de Frequência

Essa técnica é possível quando a largura de banda útil do meio de transmissão excede a largura de banda requerida por cada um dos sinais a serem transmitidos. Dessa forma, vários sinais podem ser transportados simultaneamente se cada sinal for modulado em uma frequência diferente de tal maneira que não haja sobreposição entre elas. Em outras palavras, pode-se dizer que a largura de banda do meio é dividida em sub-canais, cada um deles alocados previamente para cada uma das fontes durante todo o tempo. Na verdade apenas dois grandes problemas devem ser tratados para que o FDM possa ser utilizado adequadamente:

- *Crosstalk* – Ocorre quando componentes de sinais adjacentes se sobrepõem de forma significativa, como quando ocorre linha cruzada numa ligação telefônica.
- Ruído de Intermodulação – Quando as energias de frequências diferentes se somam gerando sinais numa frequência que é a soma ou a diferença das frequências originais. Esse efeito normalmente ocorre nos amplificadores que podem atuar de forma não linear nas componentes de um canal alterando-as de forma que acabem invadindo outros canais.

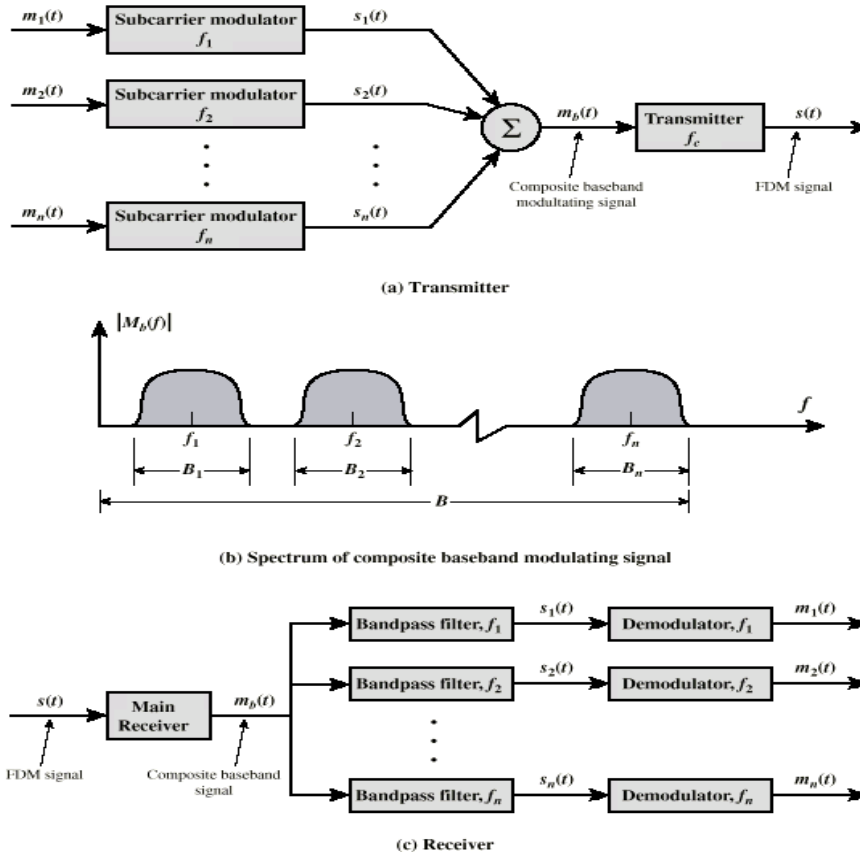
A figura a seguir apresenta um caso onde seis fontes de sinal são colocadas juntas num multiplexador, cada qual modulado em uma frequência diferente (f_1, f_2, \dots, f_6).



Cada sinal modulado requer uma certa largura de banda centrada em torno de uma frequência portadora, normalmente referenciada como um canal. Para prevenir interferências, os canais são separados por bandas de guarda ("guard bands"), as quais são porções não usadas do espectro.

O sinal composto transmitido através do meio é analógico. No entanto os sinais que dão origem ao sinal composto podem ser analógicos ou digitais. No caso de sinal de entrada digital os dados devem passar por modems para serem convertidos para a forma analógica e serem modulados na posição correta do espectro. No caso de sinais de entrada analógicos, esses devem apenas ser adaptados para a frequência correta a ser utilizada no espectro do meio de transmissão.

Como exemplo de FDM é possível citar os canais de televisão captados por antenas ou por cabos de TV coaxiais. Nesse caso cada canal possui uma largura de banda na ordem de 6MHz. Uma descrição genérica de um sistema FDM é apresentada na figura a seguir.



Um número de sinais (analógicos e/ou digitais) $[m_i(t), i = 1, N]$ deve ser multiplexados no mesmo meio de transmissão. Cada sinal $m_i(t)$ é modulado numa portadora f_{sci} . Pelo fato de que existem muitas portadoras a serem usadas, essas são conhecidas individualmente como sub-portadoras. Qualquer tipo de modulação pode ser usado em qualquer das f_{sci} 's. Os sinais modulados resultantes são então somados para produzir um sinal composto $m_c(t)$. A parte b da figura abaixo reflete o resultado. O espectro do sinal $m_i(t)$ é alterado para estar centrado em f_{sci} . Para este esquema de trabalho, f_{sci} deve ser escolhido de modo que as larguras de banda de vários sinais não se sobreponham, caso contrário, será impossível recuperar os sinais originais no destino.

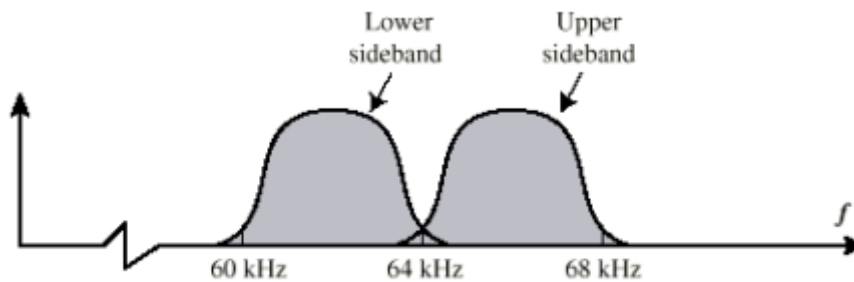
Esse sinal composto pode ser alterado como um todo para uma outra frequência mais alta, dando origem aos sistemas hierárquicos analógicos, os quais serão vistos mais adiante. É importante ressaltar que esse passo adicional de modulação não precisa usar a mesma técnica de modulação já utilizada nos passos anteriores.

Do que foi exposto é possível deduzir que a largura de banda do sinal composto é maior do que a soma das larguras de banda de todos os sinais que o formaram. No lado receptor, esse sinal composto é filtrado por N filtros passa-banda, cada um deles centrado nas mesmas frequências das sub-portadoras usadas na origem. Dessa forma o sinal é dividido em N partes e cada uma dessas partes é demodulada para recuperar o sinal original.

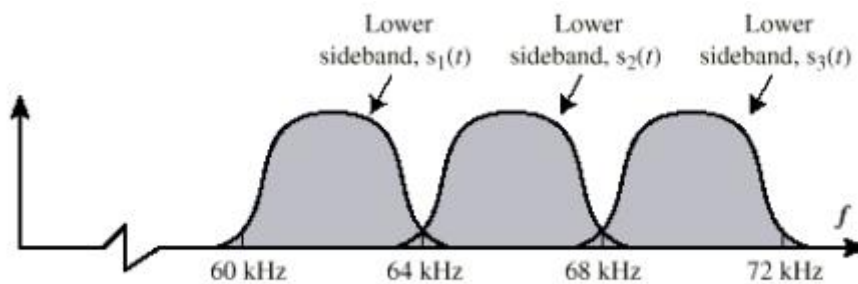
Para ilustrar um pouco mais, é possível apresentar mais um exemplo onde três sinais de voz são enviados simultaneamente sobre um meio de transmissão. Antes disso é preciso lembrar que a largura de banda de um sinal de voz é gerada em torno de 4KHz, com um espectro efetivo entre 300 até 3400Hz, conforme ilustra a figura abaixo:

(a) Spectrum of $m_1(t)$, positive f

A figura abaixo mostra um sinal de voz transportado para a faixa de frequências de 64KHz disponível num meio de transmissão qualquer. Percebe-se que o sinal modulado possui uma largura de banda de 8KHz, estendendo-se de 60 até 68KHz. Para tornar o uso da largura de banda mais eficiente, é possível eleger a transmissão apenas da faixa menor ("lower sideband") do sinal de voz.

(b) Spectrum of $s_1(t)$ for $f_1 = 64$ kHz

Finalmente, se forem utilizadas apenas a faixa menor de cada um dos três sinais de voz, as faixas de 64 até 72KHz podem ser usadas, conforme demonstra a figura seguir:



(c) Spectrum of composite signal using subcarriers at 64 kHz, 68 kHz, and 72 kHz

1.1 Hierarquia de Transmissão Analógica

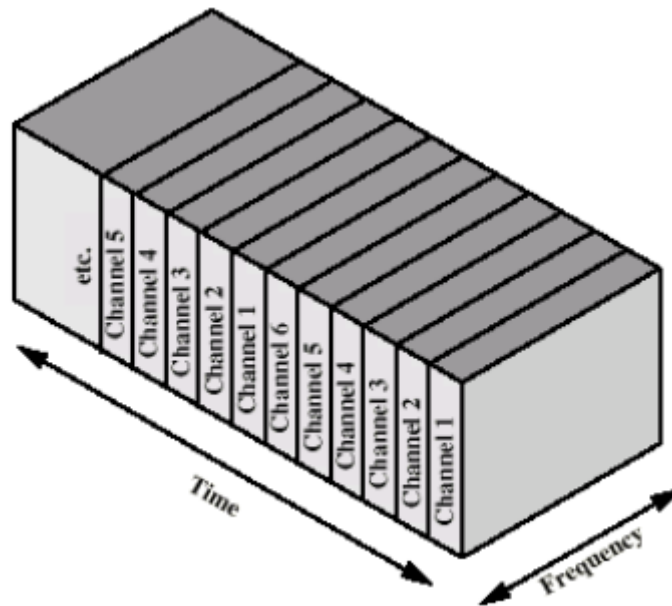
Existe um sistema de portadora de longa distância usado em todo o mundo para transmitir sinais de voz sobre enlaces de alta velocidade (ex.: cabos coaxiais, sistemas de micro-ondas etc.). Esse esquema usa a tecnologia FDM mas existem divergências nas técnicas adotadas por diferentes países.

É importante perceber que o sinal de voz original pode ser modulado diversas vezes. Por exemplo, um sinal de dados pode ser codificado usando QPSK para formar um sinal de voz analógico. Este sinal é então modulado para a portadora de 76KHz para formar um componente de um grupo. Este sinal de grupo é então modulado para a portadora na ordem de 516KHz para formar um componente de um supergrupo. Em cada um desses estágios, o sinal original pode ser distorcido em função dos equipamentos envolvidos (moduladores, amplificadores e multiplexadores). Esses equipamentos podem interpretar o sinal de forma não linear ou mesmo introduzir ruídos.

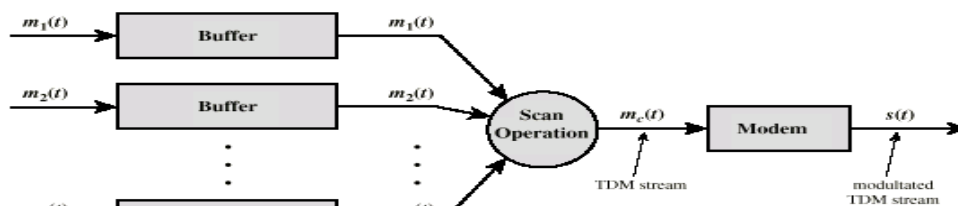
2. TDM – Multiplexação por Divisão de Tempo

É um esquema utilizado quando a taxa de transmissão de dados do meio excede a taxa de dados dos sinais digitais a serem transmitidos. Nesse caso, múltiplos sinais digitais são alternados no tempo. É importante não misturar aqui o conceito de taxa de transmissão do meio com a largura de banda do meio para não confundir com o FDM.

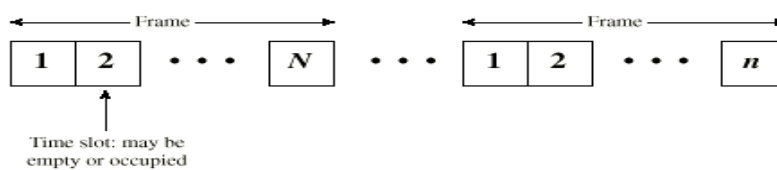
Múltiplos sinais digitais (ou sinais analógicos carregando sinais digitais) podem ser transportados em um único caminho pela interpolação (alternância) de porções de sinais de cada uma das fontes. Em outras palavras, a largura de banda do meio é completamente cedida a cada uma das fontes por um período pré-definido no tempo. O tempo de interpolação pode ser o tempo de validade de um bit, de um caractere ou de um bloco de caracteres. Por exemplo, o multiplexador da figura abaixo tem seis entradas. Se cada uma delas for de 9.6Kbps então o canal multiplexado deve ser no mínimo de 57.6 Kbps (mais uma quantidade relacionada ao overhead) para poder acomodar todas as seis entradas.



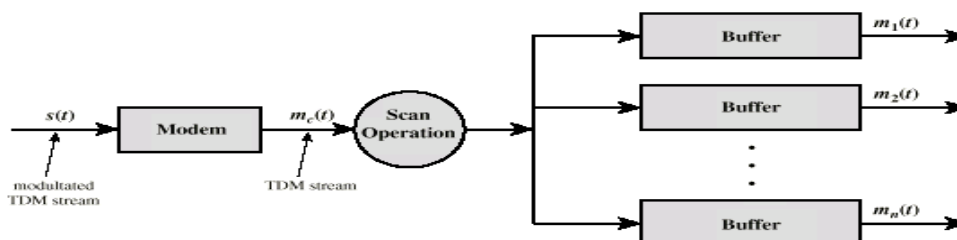
Uma descrição genérica de um TDM síncrono é provida na figura a seguir onde os sinais $[m_i(t), i = 1, N]$ devem ser multiplexados no mesmo meio de transmissão. Os sinais de entrada transportam dados digitais e são geralmente sinais digitais. Os dados de cada fonte são armazenados em pequenos buffers, normalmente do tamanho de um bit ou um caractere. Esses buffers são pesquisados sequencialmente para formar um sinal digital composto denominado $m_c(t)$. A operação de pesquisa deve ser suficientemente rápida de modo que o buffer é esvaziado antes que os dados sejam sobrepostos. O sinal digital pode ser transmitido diretamente ou passado através de um modem de modo que um sinal analógico seja transmitido. Independente da forma, a transmissão é tipicamente síncrona. Esses dados são organizados em quadros que contém um ciclo de "slot times", ou seja, são formados por um tempo pré-definido e dedicado a cada uma das fontes de entrada. É importante lembrar que uma mesma fonte pode ter mais de um "slot time" por quadro. A soma de todos os slots de tempo de uma determinada fonte em todos os quadros compõe o que se chama de canal.



(a) Transmitter



(b) TDM Frames



(c) Receiver

No receptor, o dado interpolado é demultiplexado e roteado para o buffer de destino correto, ou seja, para cada entrada $m_i(t)$, existe uma saída correspondente que irá receber o dado de entrada na mesma taxa na qual ele foi gerado.

O TDM é considerado síncrono não porque a transmissão síncrona é usada, mas por que os slots de tempo são pré-definidos e fixos para cada fonte. Os slots de tempo de cada fonte são transmitidos de qualquer maneira, mesmo que a fonte não tenha dados a transmitir (idêntico ao que ocorre no FDM). Em ambos os casos, a capacidade do meio físico é desperdiçada em nome de uma simplicidade de implementação dos multiplexadores. Mesmo com uma atribuição de tempo fixa é possível para o TDM manusear fontes de diferentes taxas

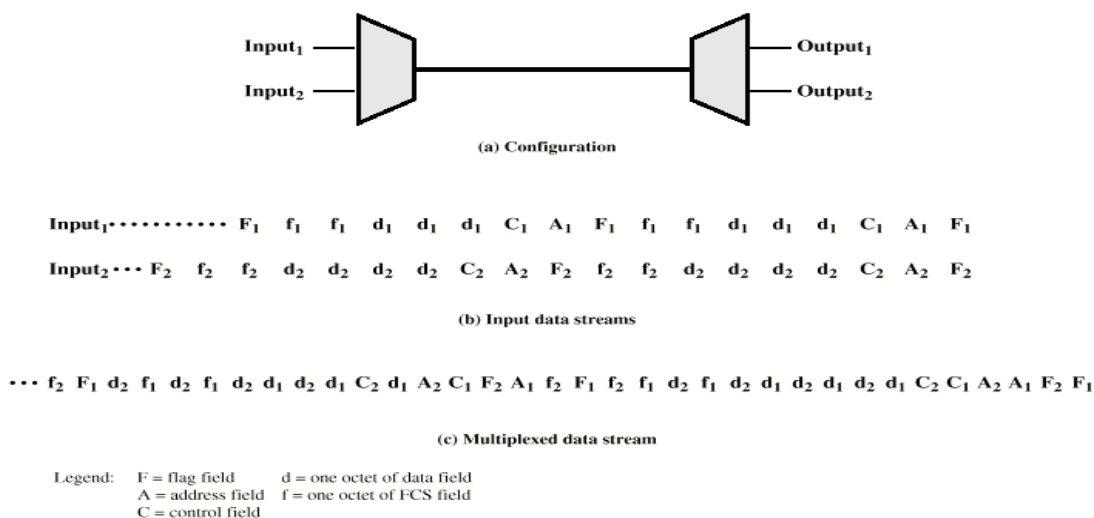
de dados. Por exemplo, a um dispositivo de entrada mais lento pode ser atribuído um slot de tempo por ciclo, enquanto que um dispositivo de entrada mais rápido pode ganhar mais de um slot de tempo.

Em termos de aplicabilidade, a técnica de interpolação de caracteres é normalmente usada com fontes assíncronas, enquanto que a interpolação de bits pode ser feita com fontes síncronas e assíncronas. No primeiro caso, cada slot de tempo contém um caractere e os bits de start/stop são eliminados antes de serem colocados no buffer. No destino esses bits são reinseridos novamente e essa estratégia resulta num aumento de eficiência da transmissão como um todo. A seção a seguir apresenta os mecanismos de controle necessários para viabilizar enlaces TDM.

2.1 Controle de Enlace TDM

Uma das características do TDM é não possuir caracteres de controle nem no início (cabeçalho ou “header”) nem no fim dos quadros (“trailer”). Mecanismos de controle de fluxo e de erro não tem sentido para o canal TDM por que o canal é dividido entre muitos pares origem-destino (canais) e um problema de um par ou canal individual não pode interferir na comunicação dos demais. Significa dizer que o controle do TDM é o próprio tempo alocado a cada fonte e nada mais.

No entanto essa constatação não impede que pares individuais implementem entre si algum mecanismo de controle de erros e de fluxo, usando protocolos específicos como o HDLC por exemplo que resolve problemas dessa ordem. A figura abaixo exemplifica dois pares comunicantes, cada um usando um protocolo com caracteres de controle entre si, mas compartilhando uma linha TDM.



Perceba que a sequência apresentada na parte c da figura é um tanto confuso e sem nexo quando vista integralmente. No entanto, considerando que o TDM consegue rotear esses caracteres para os destinos específicos, a sequência colocada na origem será remontada no destino e, dessa forma, será possível manter controles entre os pares. Como última observação sobre esse exemplo, seria interessante pensar que em cada lado existe uma combinação de um multiplexador e um demultiplexador para formar uma comunicação full-duplex.

Por outro lado, apesar de não precisar de controle de fluxo e nem de erros, a TDM precisa lançar mão de duas técnicas de enquadramento e sincronização, conforme mostra as sub-seções que se seguem.

a) Enquadramento (“Framing”)

Conforme já foi visto, o TDM não precisa de protocolos de controle para funcionar adequadamente. Apesar disso, uma de suas necessidades é tornar visível a formação dos seus quadros. Como não existem caracteres de sincronização ou delimitadores de início e fim de quadros, é preciso lançar mão de alguns mecanismos para prover a sincronização de modo que origem e destino mantenham o mesmo compasso.

Um dos mecanismos de enquadramento mais conhecidos é a técnica de adição de dígito de enquadramento. Neste esquema um bit de controle é adicionado para cada quadro TDM, gerando um “canal de controle”. Um padrão identificável de bits combinado entre origem e destino deve ser inserido em cada quadro. O exemplo mais comum é a sequência formada pela alternância de zeros e uns (101010...) entre quadros consecutivos. O receptor, sabendo da posição desse bit extra e da lei de formação para inserção desses bits, procura por um bit de framing com valor zero se no quadro anterior esse valor foi igual a um e vice-versa.

Se o padrão de bits não é encontrado, caberá ao receptor, analisar posições sucessivas dos bits que chegam até encontrar a sequência desejada. Uma vez que a sincronização está estabelecida, o receptor continua a monitorar o bit do canal de framing. Se o padrão se desfaz, o receptor reinicia o processo de análise sucessiva novamente. Como exemplo típico, pode-se citar o padrão norte americano que multiplexa 24 canais de 8 bits cada e usa um bit extra para framing, totalizando um quadro de 193 bits.

b) Inserção de Pulsos (“Pulse Stuffing”)

Talvez um dos mais difíceis problemas que o TDM deve tratar é a questão da sincronização de várias fontes de dados. Se cada fonte possuir um relógio diferente, qualquer variação entre esses relógios causará a perda de sincronismo. Dessa forma é importante pensar que o multiplexador possua um relógio próprio.

Uma outra questão é com relação à taxa de dados. O ideal no TDM é que cada fonte possua a mesma taxa de dados ou que, sendo diferentes, essas taxas sejam múltiplas entre si. Por exemplo, se uma fonte deseja transmitir à taxa de 9.6 Kbps o ideal é que as demais fontes transmitam em alguma taxa múltipla dessa (ex.: 4.8Kbps, 28.8Kbps, 57.6Kbps, etc.). Como essa nem sempre é uma realidade entre as fontes de dados, algum mecanismo deve ser utilizado para equalizar essas taxas.

Neste contexto, uma técnica conhecida como inserção de pulso (*"pulse stuffing"*) é bastante utilizada. Nessa técnica define-se a taxa de dados de saída do multiplexador, excluindo os bits de framing, com um valor maior que a soma das taxas instantâneas de entrada (vazão de entrada). Essa capacidade extra é usada para bits ou pulsos extras de modo que a taxa de dados fique compatível com um sinal de relógio gerado localmente. Os pulsos extras são inseridos em posições fixas no quadro pelo multiplexador de tal forma que o demultiplexador consiga removê-los da sequência.

Como exemplo, pode-se considerar uma situação de multiplexação de duas fontes, uma com taxa de 16Kbps e outra com taxa 6.5Kbps. Nesse caso, a fonte de 6.5 Kbps deve sofrer inserção de pulsos para chegar a 8Kbps e ser racionalmente compatível com a taxa de dados da outra fonte.

2.2 Hierarquia de Sistemas Digitais

Assim como no sistema analógico, no sistema digital existe uma hierarquia para transmissão de sinais de voz na forma digital sobre links de alta capacidade de transmissão tais como fibras óticas, cabos coaxiais e microondas. Parte da evolução dessas redes de telecomunicações usam as estruturas de transmissão TDM.

Nos EUA e no Japão existe uma hierarquia TDM cujo formato é o chamado DS-1 com quadros de 193 bits (24 sinais de voz mais um bit de framing). Considerando 8000 amostras por segundo, é possível chegar a uma taxa de 1.544 Mbps. Para cada cinco de seis quadros enviados usa-se a codificação PCM de 8 bits, enquanto que no sexto quadro usa-se a PCM com 7 bits. Nesse último caso, o oitavo bit serve para controle de sinalização contendo informações de controle da rede (ex.: estabelecimento e encerramento de chamada) e de roteamento do sinal de voz.

Esse mesmo formato DS-1 é usado para transmissão de dados digitais, só que preservando a mesma taxa final de 1.544Mbps para compatibilização com sinais de voz. Portanto, é possível gerar uma mistura de canais de dados e voz num mesmo enlace físico. No caso da transmissão de dados propriamente dita, 23 canais são providos para dados enquanto o 24º. canal é reservado para controle. Esse byte extra é usado para permitir um re-enquadramento mais confiável e mais rápido no caso de um erro de framing. Dentro de cada canal, sete bits são usados para dados enquanto que o oitavo bit é usado para indicar se naquele canal os dados contidos são do usuário ou se são dados de controle. Dessa forma é possível alcançar a taxa de 56Kbps considerando 7 bits por quadro, 8000 vezes por segundo.

Para tratamento de taxas acima e abaixo da taxa DS-1 as seguintes regras são seguidas:

- Para taxas menores – Um canal pode transportar bits a uma taxa menor do que 56Kbps. Nesse caso um bit extra é usado para indicar que aquele canal carrega uma taxa menor e, portanto, sobram 6 bits gerando um total de 48Kbps. Pode-se concluir que essa capacidade pode multiplexar 5 canais de 9.6Kbps ou 10 canais de 4.8Kbps ou 20 canais de 2.4Kbps. Por exemplo, se o canal 2 é usado para prover 9.6Kbps, então 5 sub-canais de dados compartilham esse canal e o dado para cada sub-canal aparece como blocos de 6 bits no canal 2 a cada quinto quadro.
- Para taxas maiores – Acima da taxa 1.544Mbps, as altas velocidades são obtidas pela multiplexação de bits de vários canais DS-1. Por exemplo, o sistema de transmissão DS-2 combina quatro canais DS-1 (12 bits de cada fonte) totalizando uma sequência de 6.312Mbps ($1.544 \times 4 = 6.176$ Mbps mais os bits extras para controle e *framing*).

Exercícios:

- i) Dada uma única fonte com taxa de vazão (capacidade de colocar bits no meio) igual a 2.0 bps e taxa de duto (capacidade de transmissão do meio) = 2 bps, certifique-se de que, pelo fato das capacidades da fonte e do meio de transmissão serem compatíveis, não há qualquer tipo de desperdício. Preencha a tabela abaixo simulando a transferência de bits e verificando quantos bits serão entregues ao final de 3,0 segundos.

Tempo (s)	Origem	Destino
0.5		
1.0		
1.5		
2.0		
2.5		
3,0		

- ii) Considerando uma única fonte com taxa de vazão igual a 2.0 bps e a taxa de duto = 1 bps. ao final de 3,0 segundos quantos bits serão perdidos? Certifique-se de que nessa configuração não é possível compartilhar o meio de transmissão.

Tempo (s)	Origem	Destino
0.5		
1.0		

1.5		
2.0		
2.5		
3.0		

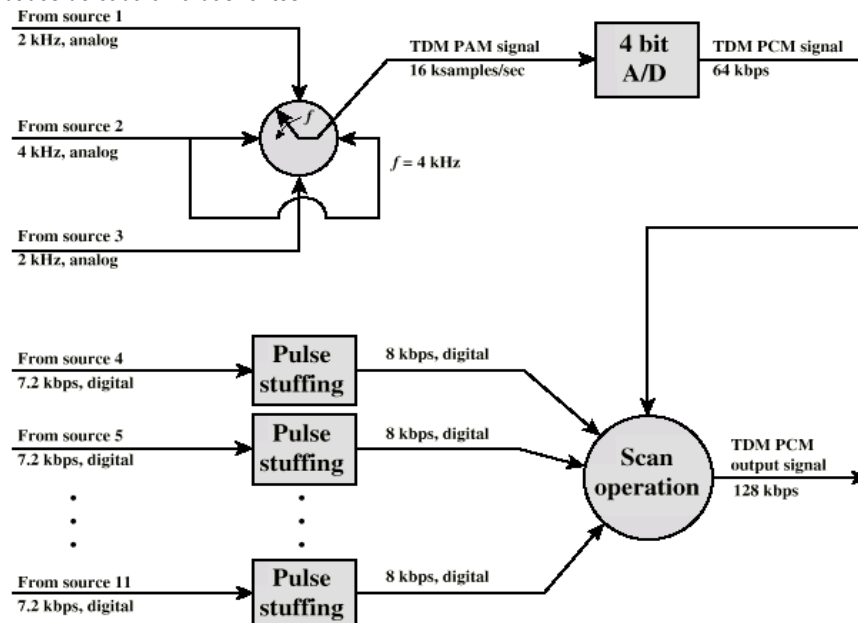
- iii) Se uma única fonte estiver com taxa de vazão igual a 1.0 bps e a taxa de duto for igual a 3 bps, ao final de 3,0 segundos quantos bits terão sido transmitidos. Quantos clientes de vazões iguais poderiam estar utilizando simultaneamente este meio para garantir um melhor aproveitamento?

Tempo (s)	Origem	Destino
0.5		
1.0		
1.5		
2.0		
2.5		
3.0		

- iv) Considere três fontes analógicas f_1 , f_2 e f_3 , com frequências iguais a 2KHz, 4KHz e 2KHz respectivamente. Considerando 4 bits por amostra, preencha a tabela abaixo com a quantidade de bits recuperados em cada fonte, de acordo com a amostragem apresentada nas linhas.

	$F_1 = 2\text{KHz}$	$F_2 = 3\text{KHz}$	$F_3 = 4\text{KHz}$	TOTAL DE BITS
8000 amostras/s				
6000 amostras/s				
4000 amostras/s				

- v) Dada a figura abaixo, na qual existem 11 fontes de dados, sendo as fontes f_1, f_2 e f_3 analógicas de 2KHz, 4KHz e 2KHz respectivamente, e as demais sendo digitais, síncronas e com taxas na ordem de 7.2Kbps. Considerando o teorema da amostragem para canais analógicos e um ciclo de 32 bits, faça um desenho esquemático de um quadro indicando quantos bits serão obtidos de cada uma das fontes.



2.3 SONET/SDH - Synchronous Optical Networks

Quando surgiram os enlaces com fibra ótica, cada companhia telefônica tinha o seu próprio sistema ótico TDM. Após a quebra da AT&T em 1984, as companhias de telefone locais tinham que se conectar com múltiplas portadoras de longa distância (WAN's), todas com diferentes sistemas óticos. Esse fato motivou o processo de padronização TDM para fibras óticas desencadeando o padrão SONET/SDH, sendo que o primeiro foi elaborado pela BellCore, enquanto que o SDH ("Synchronous Digital Hierarchy") ficou sob responsabilidade do CCITT. Esses dois padrões possuem diferenças mínimas. O resultado desse processo foi que praticamente todas as operadoras de telefonia de longa distância nos EUA usam SONET na camada física (uma interface de transmissão óptica).

Na verdade o raciocínio era de que, ao ser adotado como padrão pelos fabricantes, a tecnologia SONET poderia ser vendida a um custo baixo em cartões para PC's. Dessa forma, seria possível ao usuário se ligar diretamente ao coração da rede de telefonia sobre linhas especiais (tipo LPCD's).

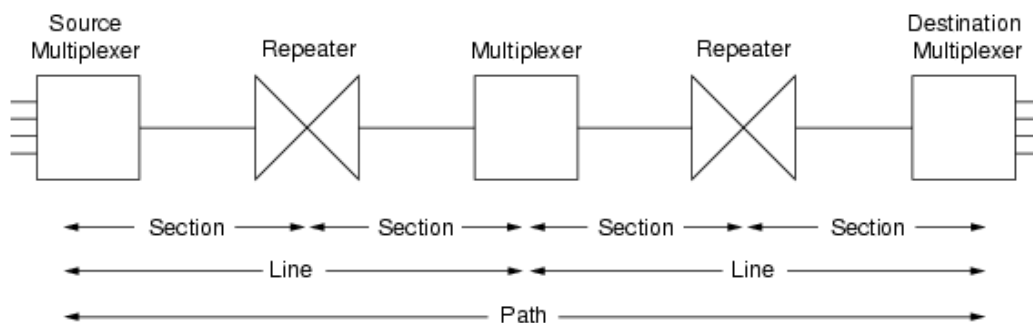
O SONET surgiu com objetivos específicos, os quais podem ser citados:

- Tornar possível a interconexão de diferentes operadoras de telefonia – Requer definir um padrão de inicialização comum que defina o comprimento de onda, a temporização a ser utilizada, estrutura do quadro a ser transmitido etc.
- Unificar os sistemas digitais Americano, Europeu e Japonês – Todos esses foram baseados em canais PCM de 64K, mas com incompatibilidades entre si em itens como formato de quadros, mecanismos de sincronização etc.
- Prover uma maneira para multiplexar vários diferentes tipos de canais digitais – Em outras palavras, continuar o processo de hierarquização de multiplexação na ordem de gigabits e acima. Quando o SONET foi criado, o T3 (canal de 44.736 Mbps) era a maior taxa de transmissão disponível (o T4 havia sido criado mas não estava sendo utilizado). Um outro compromisso era o de padronizar a multiplexação de canais de taxas baixas em um canal SONET.
- Prover suporte para OAM (Operação, Administração e Manutenção) – Os sistemas anteriores não faziam isso muito bem.

Do ponto de vista tecnológico, a primeira decisão foi fazer do SONET um sistema TDM tradicional, no qual a largura de banda completa da fibra seria atribuída para um canal contendo slots de tempo para os vários sub-canais. Portanto pode-se dizer que o SONET é um sistema síncrono controlado por um relógio mestre de alta precisão (os intervalos de envio e duração dos bits são extremamente precisos).

Obs₁: Quando a comutação de células foi proposta como base para o B-ISDN (a questão era permitir a chegada de células de forma irregular) essa foi chamada de ATM para contrastar com a operação do SONET.

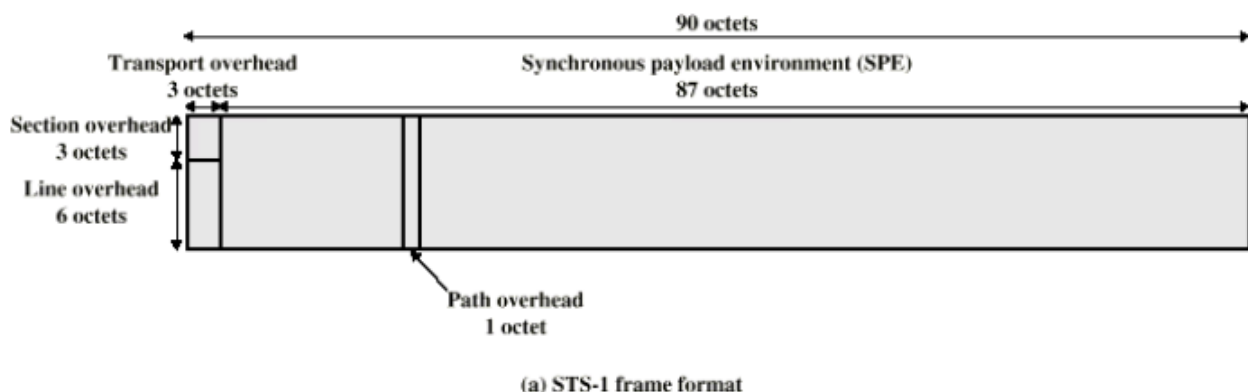
c. Componentes do SONET – Um sistema SONET consiste de switches, multiplexadores e repetidores, todos interligados por enlaces de fibra. Os enlaces entre esses dispositivos possuem denominações distintas, como mostra a figura a seguir:



Obs₂: A topologia pode ser uma malha, mas normalmente o que se vê é um anel duplo.

2.3.1 Formato do Quadro SONET

O SONET possui um quadro de 810 bytes emitidos a cada 125 microssegundos, visando coincidir com as 8000 amostras do PCM. Por ser um TDM, os quadros são emitidos com ou sem dados. Os quadros SONET são melhor vistos como uma matriz A de 90 colunas por 9 linhas, onde cada elemento A_{ij} é um octeto do quadro. Portanto a taxa mais básica do sonet, chamada STS-1 ("Synchronous Transport Signal – 1"), é de 51,84Mbps (9linhas x 90 colunas x 8 bytes x 8000 amostras/s). Todas as demais taxas são derivadas dessa.

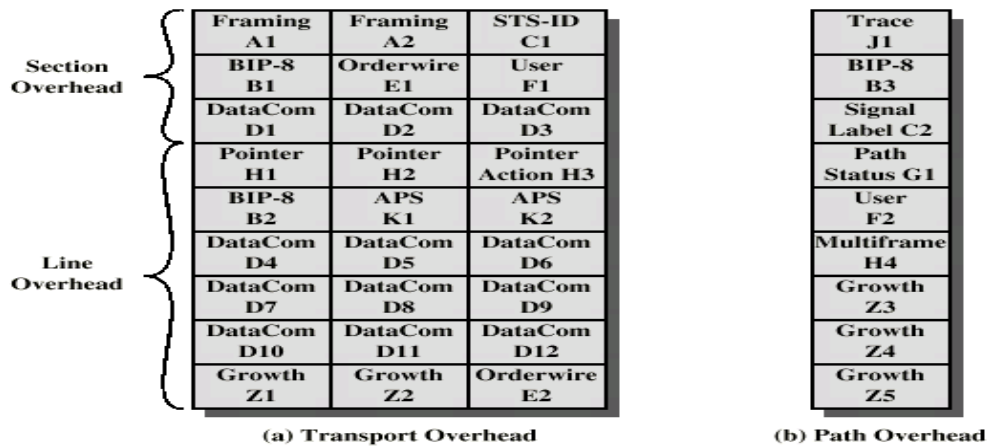


Apesar da técnica TDM tradicionalmente não possuir cabeçalho, o SONET possui 27 bytes de controle, sendo 9 bytes (3 colunas x 3 linhas) para o overhead de seção entre repetidor e multiplexador, e 18 bytes (3 colunas x 6 linhas) para o overhead de linha entre multiplexadores ponto-a-ponto. As próximas 87 colunas x 9 linhas formam o SPE ("Synchronous Payload Envelope"), que contém na primeira coluna o overhead do caminho entre multiplexadores fim-a-fim e o restante são dados do usuário. Dessa forma, pode-se caracterizar o seguinte:

- Dados de overhead = 3 colunas x 9 linhas x 8000/s = 1.728 Mbps
- SPE = 87colunas x 9 linhas x 8000/s = 50.112 Mbps, incluindo 86 colunas para dados e uma coluna para overhead de caminho

Uma das grandes características do SPE é que o mesmo pode começar em qualquer lugar no quadro. Isso porque existe um ponteiro na primeira linha do overhead de linha que diz onde o SPE se inicia, conforme demonstra a figura a seguir. Essa característica dá mais flexibilidade ao SONET que não precisa esperar até o início do próximo quadro para poder inserir dados que chegam do usuário (camada superior).

Além do que foi mencionado, o apontador de início de dados é bastante apropriado quando aquilo que vai ser transportado (ex.: uma célula ATM), possui tamanho diferente do payload SONET. Nesse caso o overhead de linha pode apontar para o início da primeira célula cheia para haver sincronização.



Pela figura acima, percebe-se que os overheads de seção, linha e caminho formam um conjunto de bytes que permitem realizar OAM. Uma vez que cada quadro ocorre 8000 vezes por segundo, esses overheads representam um canal PCM de controle.

2.3.2 Hierarquia de Multiplexação no SONET

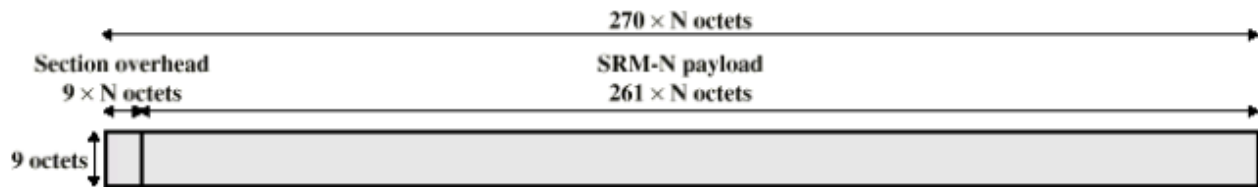
Na terminologia SONET, os canais que sofrem multiplexação são chamados tributários. Uma sequência típica de multiplexação SONET a altas velocidades é feita pela seguinte sequência de passos:

- i. Primeiro, os sistemas de baixa velocidade são convertidos para o STS-1 básico. Se houver necessidade, ocorre preenchimento de quadros vazios para completar os 51,84 Mbps desejados.
- ii. Grupos de três tributários STS-1 são multiplexados em uma saída formando um sinal denominado STS-3 de 155,52Mbps
- iii. Grupos de quatro STS-3 são multiplexados gerando uma saída denominada STS-12. Aqui ocorre um tratamento (mistura) dos bits para evitar longas sequências de zeros e um's que possam interferir no mecanismo de sincronização do relógio.

A multiplexação em todos os passos é feita byte a byte e os dados são convertidos de sinal elétrico para sinal ótico apenas no passo 3. Como um exemplo pode-se pensar na composição de três STS-1 a 51,84 Mbps. Nesse caso, o STS-3 de saída contém um byte do primeiro tributário, depois do segundo e assim por diante.

Em termos de nomenclatura, no SONET existe a convenção STS-n para sinalização elétrica e OC-n para sinalização equivalente em termos de taxa de transmissão, para a forma de representação ótica. Como exemplo, a portadora ótica correspondente à STS-n é a OC-n, ambas idênticas exceto no caso da STS-12 onde ocorre mistura dos bits, conforme já foi dito. Aqui vale mencionar algumas informações interessantes:

- ❑ Algumas taxas de transmissão tais como OC-9, OC-18 e OC-36 existem para cumprir o requisito de compatibilidade com o esquema utilizado no Japão.
- ❑ No SDH a nomenclatura apropriada para essas taxas de sinalização é STM-n. e possuem equivalência apenas a partir do OC-3 por que no SDH não existe taxa próxima de 51,84 Mbps.
- ❑ Quando uma linha não contém multiplexação embutida, ela recebe um "c" de concatenação. Como exemplo, o OC-3 indica uma portadora 155,52 Mbps composta de 3 canais OC-1's separados, enquanto que o OC-3c indica uma portadora de mesma taxa só que carregando dados de um único usuário. A quantidade de dados de um OC-3c é um pouco maior do que no OC-3 devido ao fato de que o overhead de caminho está incluído dentro do SPE apenas uma vez e no OC-3 está incluído três vezes. Em outras palavras, de 270 colunas, o OC-3c aproveita 260, enquanto que o OC-3 aproveita apenas 258. A figura abaixo apresenta um formato de quadro STM de tamanho N:



(b) STM-N frame format

3 STDM – Multiplexação por Divisão de Tempo Estatística (ou Assíncrona)

O TDM síncrono é interessante para situações onde as fontes de dados estão sempre aptas a enviar informações periodicamente e, se possível, em tempos cadenciados e fixos. Como essa nem sempre é uma realidade, existe uma alternativa para esse esquema, denominado TDM estatístico, cuja filosofia é disponibilizar o meio físico para quem estiver precisando, independente de uma sequência temporal.

Assim como no TDM normal, o estatístico possui várias linhas de entrada/saída de um lado e um enlace físico de alta velocidade do outro, sendo que as fontes (entradas) possuem buffers associados também. O multiplexador percorre os buffers de todas as fontes até que o quadro esteja preenchido e pronto para ser enviado. Um detalhe importante é que o tamanho do quadro pode ser menor do que o tamanho da soma de buffers que devem ser percorridos, por que se considera que nem todos querem transmitir ao mesmo tempo. Na saída o multiplexador recebe um quadro e distribui os slots de dados para os buffers apropriados.

Portanto, o multiplexador estatístico não envia slots vazios se existem dados a serem enviados. Portanto, durante a primeira passagem apenas os slots de A e B são enviados. Note que a significância posicional dos slots é perdida neste esquema. Portanto não sabido a quantidade de tempo que uma fonte de dados gastará em qualquer slot particular. Por que os dados chegam de forma imprevisível, informações de endereço são necessárias para garantir uma entrega apropriada. Como consequência, existem mais overhead por slot na medida em que cada slot carrega informações de endereço e dados do usuário.