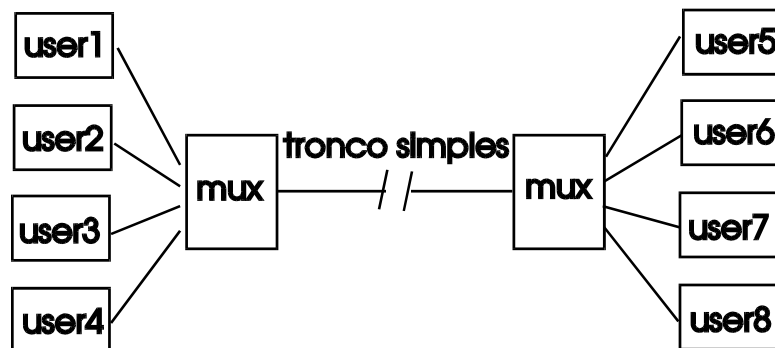


1 MULTIPLEXAÇÃO

Multiplexar é enviar um certo número de canais através do mesmo meio de transmissão. Os dois tipos mais utilizados são: multiplexação por divisão de frequências (FDM) e multiplexação por divisão de tempo (TDM).

O objetivo básico para a utilização desta técnica é economia, pois utilizando o mesmo meio de transmissão para diversos canais economiza-se em linhas, suporte, manutenção, instalação, etc.

CONCEITO DE MULTIPLEXADOR:



O problema em uma transmissão multiplexada é evitar a interferência entre os vários canais que se está transmitindo. Cada técnica que será analisada a seguir utiliza um método diferente para não deixar essa interferência ocorrer.

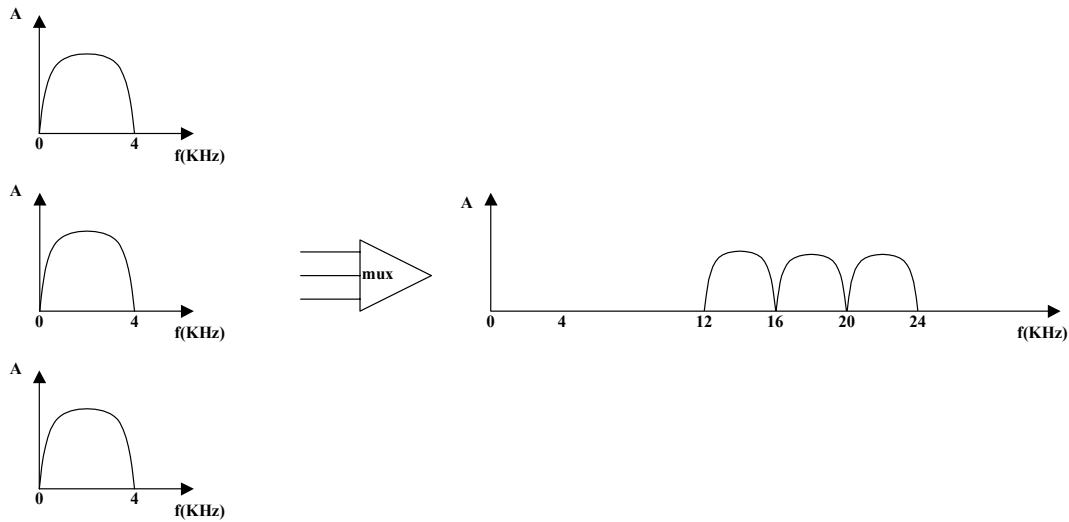
1.1 FDM – Frequency Division Multiplexing

Em FDM, o espectro de frequências é dividido em vários canais lógicos, com cada usuário possuindo sua largura de banda própria. Dessa forma, cada canal analógico é modulado em frequências diferentes entre si, evitando a interferência. A figura a seguir mostra uma multiplexação de 3 canais de telefone (faixa de frequência original de 0 a 4KHz) sendo multiplexados entre 12KHz e 24KHz. Nota-se que cada canal continua com um espaço equivalente à sua largura de banda original (4KHz), porém, deslocado em frequência no espectro. A recuperação do sinal é semelhante, com o demultiplexador deslocando o sinal para a faixa de frequência original.

Considera-se que a largura de banda destinada a uma ligação telefônica é de 4 KHz, como já foi mencionado anteriormente.

Em um sistema de telefonia, a comunicação de voz faz um trajeto desconhecido pela maioria das pessoas, passando por diversos tipos de meio físico, como par de fios, fibra ótica, comunicação via microondas, sofrendo sucessivas multiplexações e reconstituições do sinal, sendo digitalizado e recuperado novamente, algumas vezes indo até o satélite a 36.000 Km de altitude e retornando para outro ponto na terra, e assim por diante. Além disto, não é apenas um ou dois usuários que estão envolvidos nesta comunicação, na verdade existem milhares de

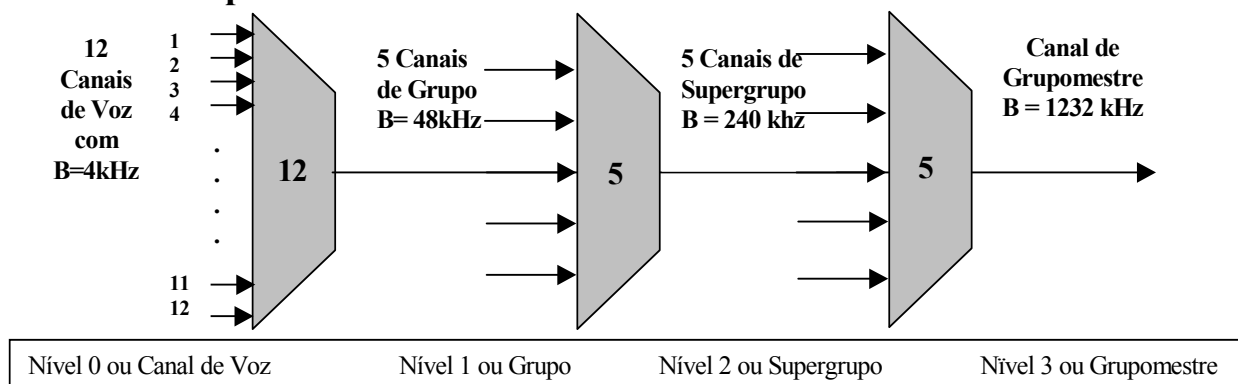
peças se comunicando simultaneamente, levando à necessidade de existir uma estrutura que suporte isto.



Para tornar realidade essa interconectividade, foi necessário o uso extensivo da multiplexação dos canais de voz. No primeiro nível de multiplexação FDM, 12 canais de voz são multiplexados, formando o chamado canal de Grupo. Cinco canais de Grupo, por sua vez, são multiplexados em um canal de Supergrupo, que contém 60 canais de voz. No terceiro nível, cinco canais de Supergrupo são multiplexados em um canal de Grupo Mestre, que carrega 300 canais de voz, e em seguida o Super Grupo Mestre, com 900 canais (ITU-T). A tabela a seguir apresenta os detalhes.

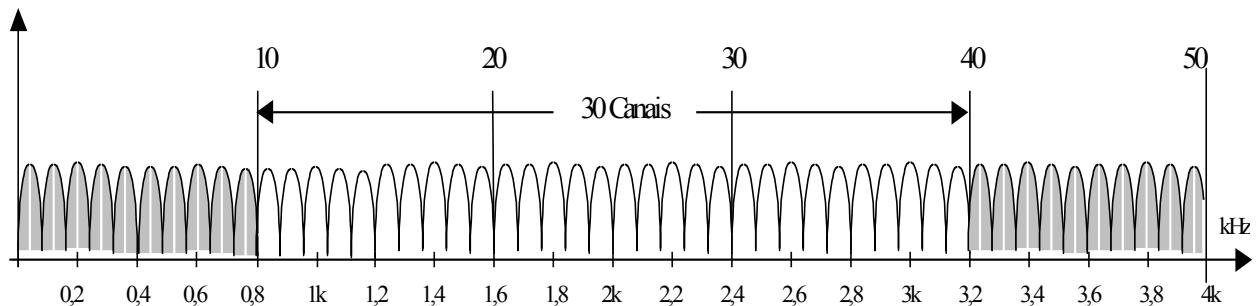
Nível de Multiplexação	Denominação do canal agregado	Frequências limites do canal [kHz]	Banda do Canal [kHz]	Número de canais de voz
0	Canal de Voz	0 - 4	4	1
1	Canal de Grupo	60 - 108	48	12
2	Canal Supergrupo	312 - 552	240	60
3	Canal Grupomestre	812 - 2044	1232	300
4	Super Grupo mestre	8516 - 12388	3872	900

Sistema Multiplex FDM de Telefonia



1.1.1 Submultiplexação do Canal de Voz

O canal de voz também pode ser submultiplexado em canais de telex ou telegrafia com bandas menores, como é mostrado na figura. Neste exemplo foram multiplexados 30 canais de 80Hz, dos 50 canais teóricos possíveis /ROC 99/



1.1.2 Técnicas especiais de multiplexação

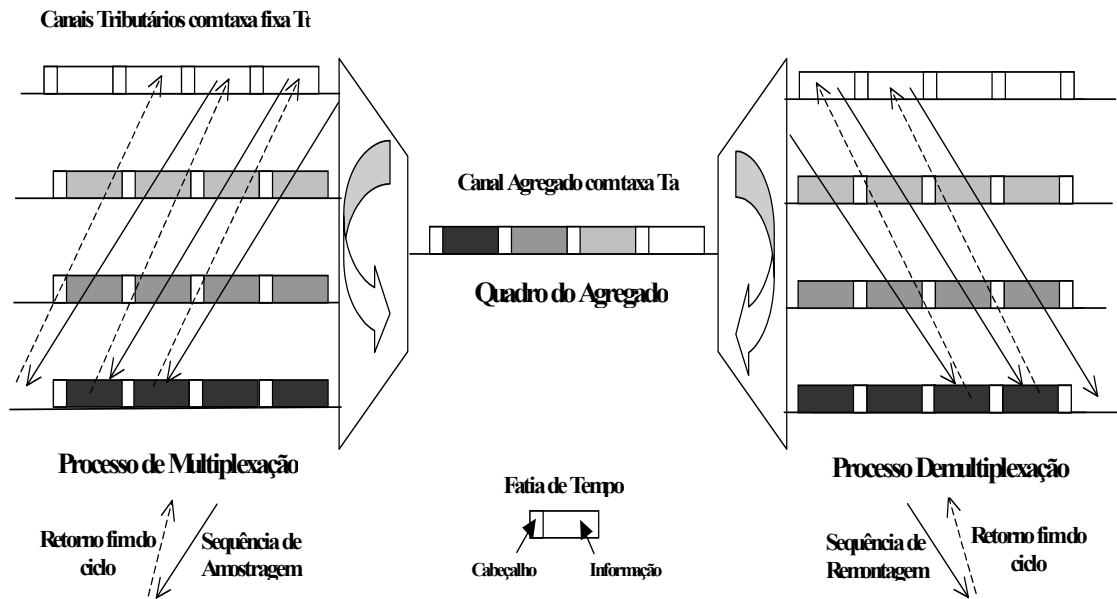
Existem ainda duas técnicas especiais de multiplexação FDM, conhecidas por WDM e ECM, descritas a seguir /ROC 99/.

- **WDM (*Wavelength Division Multiplex*):** é a técnica utilizada principalmente em comunicações óticas, em que os canais lógicos são caracterizados por um dado comprimento de onda da luz.
- **ECM (*Echo Cancelling Multiplex*):** é atualmente empregada na implementação dos dois canais de dados em um sistema *full-duplex* operando em uma linha de acesso de assinante telefônico. Neste caso o sinal é transmitido na mesma banda pelas duas pontas do enlace e em cada um é retirado o sinal de transmissão (eco), a fim de obter o sinal de recepção. Feito normalmente através de DSPs (*Digital Signal Processors*). Outra forma de utilização é para fazer teleconferências em PABX digitais. Nesse caso, todos os canais de voz são misturados, e um determinado receptor joga para o canal do ouvido do usuário todos os sinais subtraídos do sinal dele mesmo.

1.2 TDM – Time Division Multiplexing

Na multiplexação por divisão de tempo, são amostrados ciclicamente os diversos canais tributários e em cada amostragem é recolhida uma fatia de sinal (fatia de tempo), que é utilizada na montagem de um quadro agregado, que corresponde às amostragens de todos tributários durante um ciclo de amostragem.

Na figura é ilustrado o processo MUX/DEMUX de um sistema multiplexador TDM



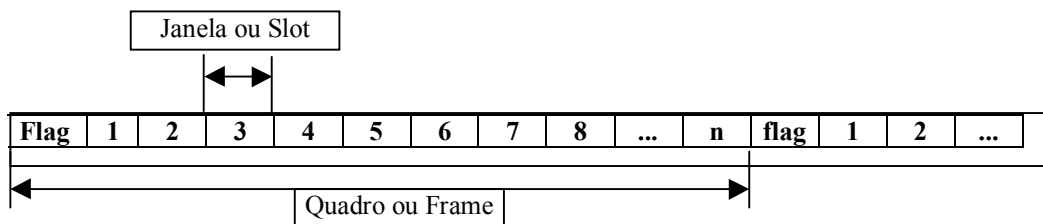
Um ponto importante a ser observado é que a velocidade necessária na linha (T_a) deve ser, no mínimo, igual à soma das velocidades de todos os canais de entrada (T_t), pois de outra forma não haveria tempo para amostrar e transmitir os sinais de todos os canais.

1.2.1 Multiplexação síncrona no tempo

As principais características da multiplexação TDM síncrona são as seguintes /ROC 99/.

- Sistema é totalmente síncrono e as taxas, tanto dos canais tributários como do canal agregado, são constantes e fixas.
- Num sistema TDM, a soma das taxas dos tributários deve ser igual à taxa do canal agregado: $T_a = \sum_i T_{t_i}$
- Sistemas TDM são implementados em *hardware*, através de equipamentos específicos.
- TDM é largamente utilizado no suporte telefônico onde a base são os canais digitais de voz de taxa fixa.

Nos multiplexadores TDM síncronos, é enviado um sinal (pode ser bit ou byte) de cada canal, independente se este canal está ativo ou não. A figura a seguir mostra um exemplo de transmissão para n canais. A flag enviada no início de cada quadro possui o objetivo de sincronizar os dois multiplexadores.



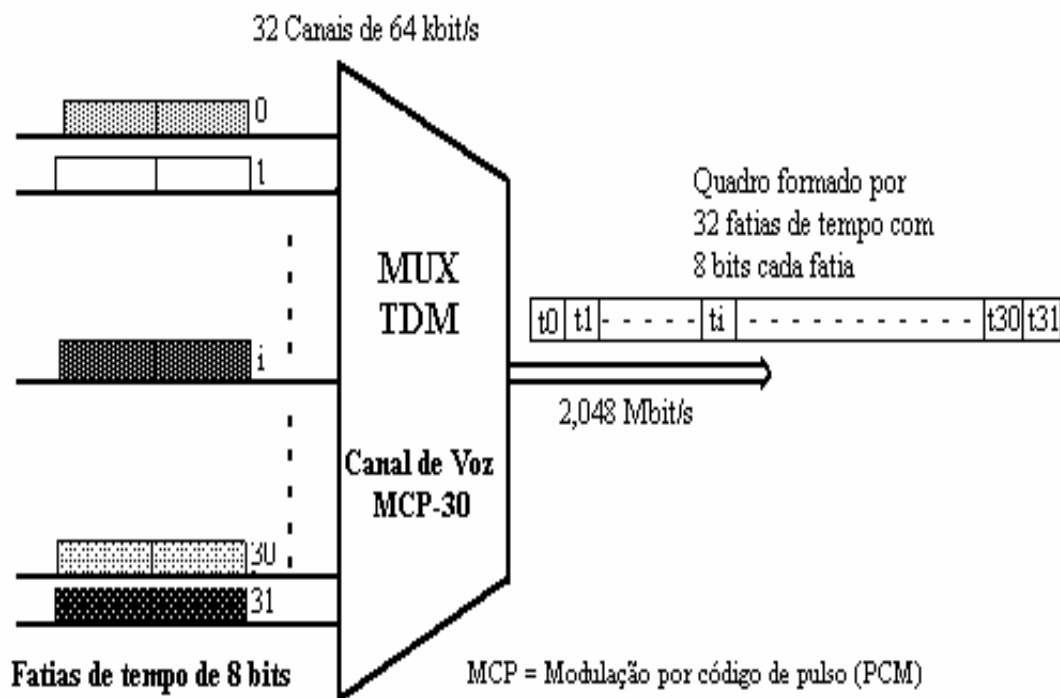
Neste tipo de multiplexador, existe um desperdício na transmissão de dados, pois é alocado uma janela ou slot para o canal independente se este canal está transmitindo dados ou não.

Um exemplo prático é o da multiplexação TDM de canais de voz digitais no Brasil (Sistema PCM*30 da Telebrás), visto na figura a seguir.

Características:

- Cada canal é amostrado 8000 vezes/s, gerando cada vez uma fatia de tempo constituída de 8 bits. ($8000/s \times 8 \text{ bit} = 64 \text{ kbit/s}$)
- Canal de Voz digital: Fatias de Tempo de 8 bits (octeto) repetidos de 125 em 125 μs .
$$\text{Taxa} = \frac{8}{125 \cdot 10^{-6}} = 64 \text{ kbit} / \text{s}$$
- 32 fatias de tempo (Slot times) são agregadas em um quadro constituído de $32 \times 8 \text{ bits} = 256 \text{ bits}$ com duração de $125 \mu\text{s}$ ($1/8000$).
- A comutação de fatias de tempo dentro do quadro é feita segundo uma matriz de comutação do tipo 32×32 .

Nota: O sinal de voz no Brasil ainda chega sob forma analógica na central e através do CODEC (codificador /decodificador, é transformado em sinal digital de 64 kbit/s.



1.2.2 Multiplexação assíncrona no tempo

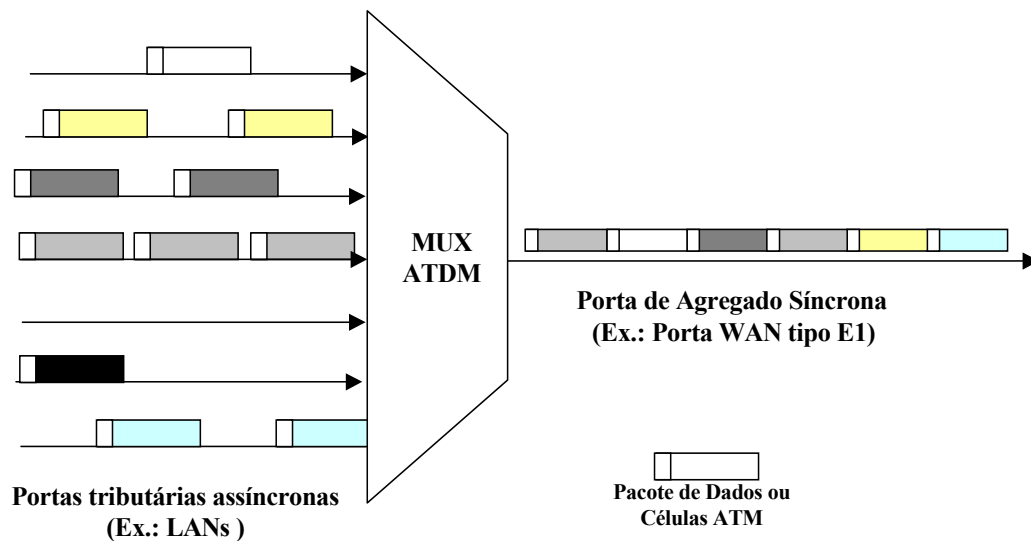
Um outro tipo de multiplexador TDM, utilizado para resolver o problema do desperdício, é chamado multiplexador estatístico ou ATDM (*Asynchronous TDM*), que envia primeiro o endereço do canal relativo à informação, para então enviar o dado. Isso otimiza o processo de multiplexação recolhendo nas portas tributárias os pacotes de dados de acordo com a sua demanda ou taxa. Portas inativas não ocupam espaço no quadro agregado. É necessário que os pacotes contêm um cabeçalho para que possa ser distinguido a que porta se destina o pacote. A figura a seguir ilustra isso.

Características da multiplexação assíncrona /ROC 99/:

- É satisfeita a seguinte relação entre as taxas dos tributários e a taxa do agregado.

$$T_a < \sum_{i=1}^n T_{t_i} \quad \text{onde } T_a: \text{Taxa do Agregado e } T_{t_i} \text{ é a taxa dos tributários}$$

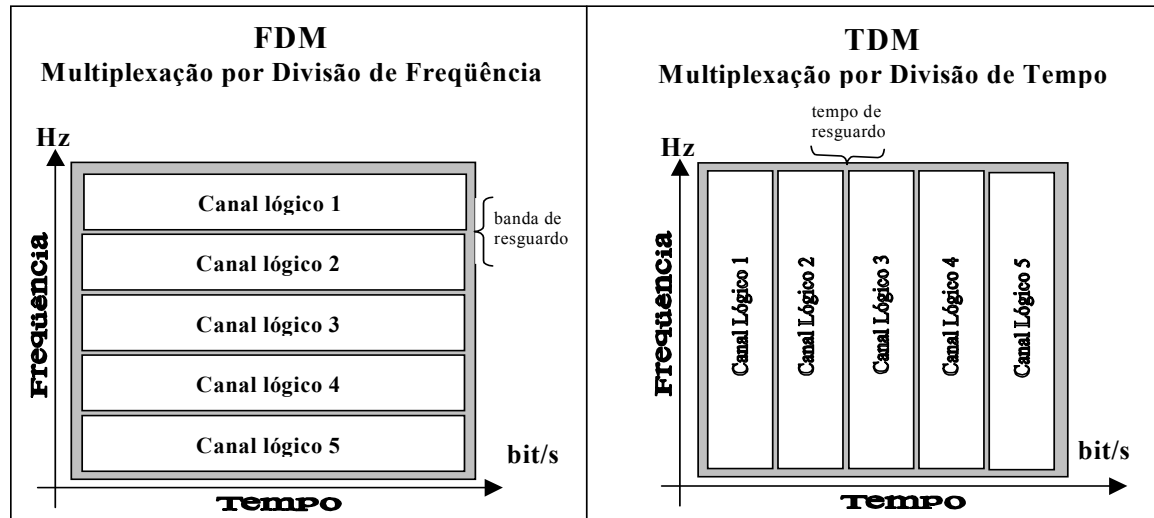
- As portas tributárias devem ter buffers adequados para atender picos de demanda dos canais para que não haja perda de pacotes.
- É atualmente a tecnologia mais avançada na otimização dos meios de comunicação.



O multiplexador estatístico é bastante utilizado para multiplexar a comunicação de vários terminais com um computador central. Normalmente, quando existem vários terminais de usuários, nem todos estão ativos simultaneamente, e quando estão, tem várias pessoas trabalhando com edição de texto ou processos que não exigem tanto do meio de transmissão. Dessa forma, é possível utilizar uma linha única que não necessita de uma velocidade igual à soma das velocidades dos terminais, barateando custos de transmissão. Além disso, é usado em switches ATM e roteadores de pacotes tipo X.25.

Entretanto, caso todos os terminais enviem dados simultaneamente, o multiplexador estatístico enfrenta problemas, pois a velocidade que seria necessária para suportar tal demanda seria maior que a soma das velocidades de cada terminal (pois agora existe a necessidade de enviar também um endereço). Para evitar perda de dados devido a esse problema (já que a velocidade da linha é inferior à soma das velocidades dos terminais), ele possui um buffer que armazena informações em excesso, para depois enviá-las conforme a linha for descongestionando.

1.3 Comparação entre FDM e TDM



1.3.1 Características da técnica de multiplexação FDM

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

1.3.2 Características da técnica de multiplexação TDM

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

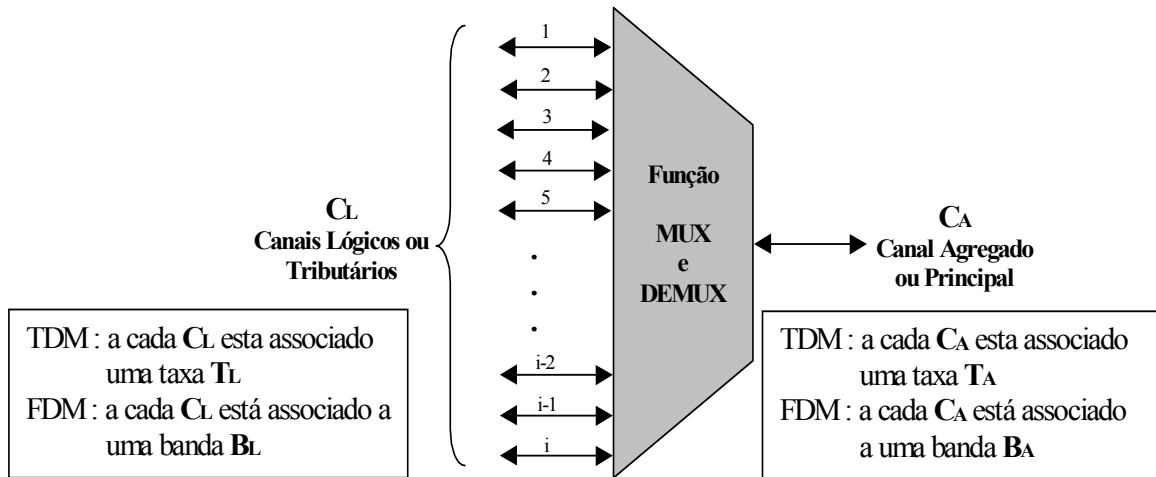
1.3.3 Canais Lógicos e Multiplexação

O canal lógico possui uma implementação física real no nível físico, não deve ser confundido com o conceito de circuito virtual ou canal virtual do nível de rede. O canal lógico é uma entidade física que possui uma caracterização através das técnicas de multiplexação tanto em FDM como TDM. Pode-se distinguir dois tipos de canais lógicos /ROC 99/:

- **Canais analógicos:** associados à multiplexação analógica FDM, sendo caracterizados através de uma determinada largura de banda B, medida em Hz. Exemplos: canal de voz telefônico (B = 4 kHz nominal (útil 3,1 kHz)), canal de rádio (B = 10 kHz (típico)), canal de televisão (B = 6 MHz);
- **Canais digitais:** associados à multiplexação digital TDM, sendo caracterizados através de uma determinada taxa, medida em bit/s. Exemplos: canal digital de

voz (taxa: 64 kbit/s), canal E1 (MUX 1º nível - taxa: 2,048 Mbit/s), canal E3 (MUX 3º nível - taxa: 34 Mbit/s).

O multiplexador representado na figura a seguir realiza tanto as funções de multiplexação como demultiplexação, ou seja, é duplex, obedecendo às relações indicadas.



As seguintes relações devem ser obedecidas em multiplexadores:

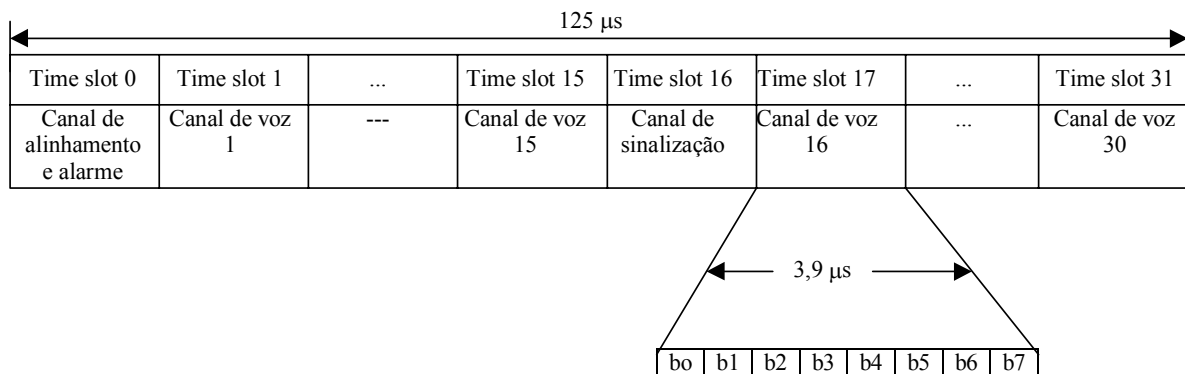
$$\text{TDM} \Rightarrow T_A \geq \sum_1^i T_{L_i} \quad \text{FDM} \Rightarrow B_A < \sum_1^i B_{L_i}$$

1.4 Sistema PCM30 – E1 (G.732 – ITU-T)

OBS: texto extraído de /MOE 95/.

Esse sistema é utilizado na Europa, América do Sul e na maioria dos enlaces internacionais. Conhecido também como CEPT1 ou 2M ou E1. No PCM30, é possível transmitir simultaneamente 30 canais de voz, amostrados a 8KHz, utilizando a lei A em 13 segmentos na compensação do sinal e 8 bits para codificação das palavras PCM.

Os canais de voz são combinados através da intercalação de palavras, formando um quadro de 30 palavras para os canais de voz e mais duas palavras de 8 bits (time slot 0 e 16) para as funções de alinhamento e sinalização, de forma que o quadro fica com 256 bits, resultando numa taxa de transmissão global de 2048Kbps, como mostra a figura.



A estrutura de multiquadro é um conjunto de 16 quadros numerados de Q0 a Q15, dentro do qual pode-se observar as seguintes características (mostradas na tabela a seguir):

- A palavra de alinhamento de quadro (PAQ=0011011) são os bits b1 a b7 do time slot 0 dos quadros pares (Q0, Q2, Q4, ...).
- A palavra de alinhamento do multiquadro (PAMQ=0000) são os bits b0, b1, b2 e b3 do time slot 16 do quadro Q0.
- O alarme de perda de alinhamento do multiquadro é o b5 do time slot 16 do quadro Q0
- A palavra de serviço é formada pelos bits b1 a b7 do time slot 0 dos quadros ímpares Q1, Q3, ..., Q15. O bit b1 da palavra de serviço é fixado em 1 para evitar a simulação da PAQ. O bit b2 é utilizado para indicar alarme urgente, onde 1 indica a presença de um dos seguintes alarmes: falha na fonte, falha no CODEC, perda de alinhamento do quadro, perda do sinal de entrada de 2048Kbps, erro do sinal de alinhamento de quadro superior a 10^{-3} .
- O bit b0 do time slot 0, assinalado com R, é reservado para uso internacional, enquanto que os bits assinalados com X são reservados para uso nacional.

A sinalização de linha é transmitida nos 8 bits do time slot 16 dos quadros Q1 a Q15. O significado dos bits muda conforme o número do quadro, sendo que no quadro Qi, os bits b0 b1 b2 b3 correspondem à sinalização de linha do canal telefônico i e os bits b4 b5 b6 b7 correspondem ao canal telefônico i+15.

Quadro	Uso dos bits dos time slots 0		Uso dos bits dos time slots 16		Time slots 1-15 e 17-31
	Palavra de alinh. quadro	Palavra de serviço	Canal de sinalização de linha		
	b0b1b2b3b4b5b6b7	b0b1b2b3b4b5b6b7	b0b1b2b3	b4b5b6b7	
Q0	R 0 0 1 1 0 1 1	-	0 0 0 0	X A X X	b0-b7
Q1	-	R 1 A X X X X X	Canal telef. 1	Canal telef. 16	b0-b7
Q2	R 0 0 1 1 0 1 1	-	Canal telef. 2	Canal telef. 17	b0-b7
Q3	-	R 1 A X X X X X	Canal telef. 3	Canal telef. 18	b0-b7
Q4	R 0 0 1 1 0 1 1	-	Canal telef. 4	Canal telef. 19	b0-b7
Q5	-	R 1 A X X X X X	Canal telef. 5	Canal telef. 20	b0-b7
Q6	R 0 0 1 1 0 1 1	-	Canal telef. 6	Canal telef. 21	b0-b7
Q7	-	R 1 A X X X X X	Canal telef. 7	Canal telef. 22	b0-b7
Q8	R 0 0 1 1 0 1 1	-	Canal telef. 8	Canal telef. 23	b0-b7
Q9	-	R 1 A X X X X X	Canal telef. 9	Canal telef. 24	b0-b7
Q10	R 0 0 1 1 0 1 1	-	Canal telef. 10	Canal telef. 25	b0-b7
Q11	-	R 1 A X X X X X	Canal telef. 11	Canal telef. 26	b0-b7
Q12	R 0 0 1 1 0 1 1	-	Canal telef. 12	Canal telef. 27	b0-b7
Q13	-	R 1 A X X X X X	Canal telef. 13	Canal telef. 28	b0-b7
Q14	R 0 0 1 1 0 1 1	-	Canal telef. 14	Canal telef. 29	b0-b7
Q15	-	R 1 A X X X X X	Canal telef. 15	Canal telef. 30	b0-b7

Tendo 4 bits para cada canal na sinalização de linha (slot 16), tem-se uma taxa de transmissão de dados de 2Kbps, pois são 4 bits a cada 16 quadros, ou seja, a 8000 quadros por segundo, ou 500 multiquadros (sequências de 16 quadros) por segundo, vê-se que 4 bits dá uma taxa de 2Kbps (4x500).

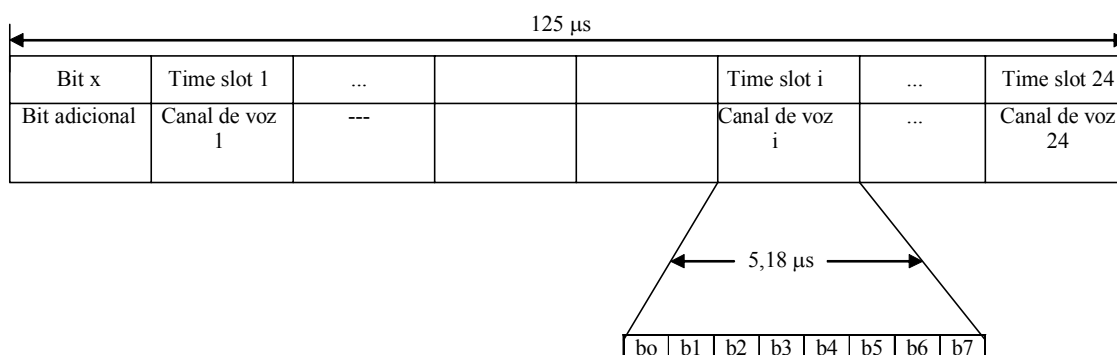
O procedimento descrito acima é para sinalização canal por canal. Existem outros métodos de sinalização, como:

- Sinalização por MFC (Multifrequencial Compelido): a mesma utilizada no sistema analógico, só que nesse caso os sinais são convertidos em digitais pelos CODECS;
- Sinalização no byte, canal por canal (*bit stealing*): o bit menos significativo da palavra PCM é periodicamente reservado para sinalização, resultando em uma degradação quase imperceptível na qualidade da transmissão telefônica, mas bastante prejudicial em comunicação de dados;
- Sinalização fora do byte: usado no Brasil, é o descrito acima
- Sinalização por canal comum: um conjunto de bits é reservado para sinalização, formando um canal de comunicação de dados. O canal de dados é utilizado de acordo com a necessidade de todos os canais. A sinalização é feita através de mensagens rotuladas, onde o rótulo indica o canal à qual a mensagem pertence. Esse tipo de sinalização é a tendência para o futuro.

1.5 Sistema PCM24 – T1 (G.733 do ITU-T)

Sistema utilizado no Japão, EUA e todos países cujo código internacional é “1”. Permite a transmissão simultânea de 24 canais de voz, amostrados 8000 vezes por segundo, segundo a lei μ .

Os 24 canais de voz formam 192 bits, mas o quadro possui 193 bits no total, pois um é utilizado para alinhamento de quadro e multiquadro. A taxa de transmissão é 193×8000 , ou 1.544 kbit/s, ou 1,5 Mbit/s. A estrutura de quadro é mostrada a seguir.



No PCM-24, a sinalização pode ser no byte ou fora do byte, conforme descrição a seguir.

- **Sinalização no byte – *bit stealing***: o bit menos significativo (b0) dos quadros 6 e 12 é “roubado” da codificação de voz, sendo utilizado para sinalização. Nesse caso, tem-se: a) alinhamento: 8000 bit/s (um bit por pacote); b) sinalização: 32.000 bit/s (24 bits a cada 6 quadros, ou quatro bits por quadro – com 8000 quadros por segundo, resultando em 32.000 bits/s); c) canal de voz: 62.666,67 bit/s (64.000 bit/s – sinalização no byte = 64.000 bit/s – 32.000/24). Esse tipo de sinalização gera problemas para transmissão de dados, pois desconsidera bits de transmissão.
- **Sinalização fora do byte**: nesse caso, a palavra de alinhamento de multiquadro é eliminada, deixando PAMQ para canal comum. Assim, as taxas são: a) alinhamento de quadro: 4000 bit/s (um bit por pacote nos quadros ímpares); b) sinalização: 4.000 bit/s (um bit por pacote nos quadros pares); c) canal de voz: 64.000 bit/s.

A palavra de alinhamento de quadro PAQ é 101010, transmitida nos quadros ímpares, conforme figura a seguir. A palavra de alinhamento de multiquadro é 001110, transmitida nos quadros pares, conforme figura a seguir.

Quadro	Uso do bit adicional x		Time slots 1-24	
	PAQ	PAMQ ou canal comum	Canal telefônico de voz	Sinalização de linha
Q1	1	-	b0..b7	
Q2	-	0	b0..b7	
Q3	0	-	b0..b7	
Q4	-	0	b0..b7	
Q5	1	-	b0..b7	
Q6	-	1	b1..b7	b0=canal a
Q7	0	-	b0..b7	
Q8	-	1	b0..b7	
Q9	1	-	b0..b7	
Q10	-	1	b0..b7	
Q11	0	-	b0..b7	
Q12	-	0 (1 é alarme)	b1..b7	b0=canal b

1.6 BIBLIOGRAFIA

- /MOE 95/ Moecke, Marcos. **Curso de Telefonia Digital - Multiplexação por Divisão de Tempo e Transmissão Digital**. Escola Técnica Federal de Santa Catarina São José. 1995. 25p.
- /ROC 99/ ROCHOL, Juergen. **Redes de Computadores – 2ª parte**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Informática. 1999.