

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CEFET/SC - Unidade de São José
Curso Técnico em Telecomunicações

Telefonia Digital

Multiplexação por divisão de tempo
e Transmissão digital PDH e SDH

Marcos Moecke e
Saul Caetano Silva

São José - SC, 2006

SUMÁRIO

2. MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE TEMPO E TRANSMISSÃO DIGITAL.....	4
2.1 INTRODUÇÃO.....	4
2.2 TIPOS DE MULTIPLEXAÇÃO.....	5
2.2.1 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIAS (FDM)	5
2.2.2 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE TEMPO (TDM)	6
2.2.3 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA (WDM)	6
2.3 O ESPECTRO DO SINAL MULTIPLEXADO.....	7
2.4 PARÂMETROS DA MULTIPLEXAÇÃO TDM/PCM.....	8
2.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA MULTIPLEXAÇÃO TDM/PCM.	9
2.6 ESTRUTURA FÍSICA DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO TDM/PCM..	10
2.7 ESTRUTURA LÓGICA DO SISTEMA TDM/PCM	10
2.7.1 ORGANIZAÇÃO DO QUADRO	10
2.7.2 ALINHAMENTO DO QUADRO.....	12
2.7.3 SINALIZAÇÃO	13
2.8 SISTEMAS PCM DE 1 ^A ORDEM.....	14
2.8.1 SISTEMA PCM24 (ITU-T G.733/706)	14
2.8.2 SISTEMA PCM30 (ITU-T G732/706)	16
2.8.3 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS PCM DE 1 ^A ORDEM.	19
2.9 HIERARQUIA DIGITAL PLESIÓCRONA - PDH.....	20
2.9.1 HIERARQUIAS PLESIÓCRONAS E SEUS PONTOS DE INTERFACE.....	22
2.9.2 PROCESSO DE JUSTIFICAÇÃO	22
2.9.3 HIERARQUIA DIGITAL PLESIÓCRONA EUROPÉIA	24
2.10 HIERARQUIA DIGITAL SÍNCRONA - SDH.....	25
2.10.1 MAPEAMENTO DOS TRIBUTÁRIOS PDH	26
2.10.2 MULTIPLEXAÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS PDH	27
2.10.3 QUADRO STM-1	30
2.10.4 QUADRO STM-N.....	31
2.10.5 VANTAGENS DA SDH.....	32
2.11 SINCRONIZAÇÃO DA REDE	32
2.11.1 PLESIÓCRONA	34
2.11.2 BITS DE ENCHIMENTO AO LONGO DE TODA A REDE	34
2.11.3 SINCRONIZAÇÃO MÚTUA	35
2.11.4 SINCRONIZAÇÃO MESTRE	35
2.11.5 SINCRONIZAÇÃO MESTRE-ESCRAVO.	35
2.11.6 REDE COMUTADA A PACOTES.....	36
2.12 UTILIZAÇÃO DOS MEIOS PARA A TRANSMISSÃO DIGITAL.....	36

2.13	COMPONENTES DA REDE SDH.....	38
2.13.1	REGENERADOR	38
2.13.2	EQUIPAMENTO PDH PRIMÁRIO	39
2.13.3	TERMINAIS DE LINHA (MULTIPLEXADORES)	40
2.13.4	MULTIPLEXADORES ADM (ADD AND DROP).....	40
2.13.5	DIGITAL CROSS CONNECTS(DXC)	41
2.13.6	ANEL SDH.....	41
2.14	TECNOLOGIA WDM.....	42
2.15	COMPONENTES DE REDES WDM	45
2.16	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

2. MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE TEMPO E TRANSMISSÃO DIGITAL

2.1 Introdução.

A multiplexação é uma operação que consiste em agrupar vários canais de informação não relacionados, de modo a transmiti-los simultaneamente em um mesmo meio físico (cabo, enlace de rádio, satélite, fibra ótica, etc.) sem que haja mistura ou interferência dos canais. A demultiplexação é a separação dos canais, recuperando a informação individual de cada canal.

Os motivos econômicos são os que determinam o uso da multiplexação nas mais diversas situações. Apesar de um sistema que utiliza a multiplexação necessitar de mais equipamentos, muitas vezes o custo do equipamento multiplexador pode ser compensado pela economia gerada ao se compartilhar um mesmo meio de transmissão com z canais, conforme mostra a Figura 2.1.

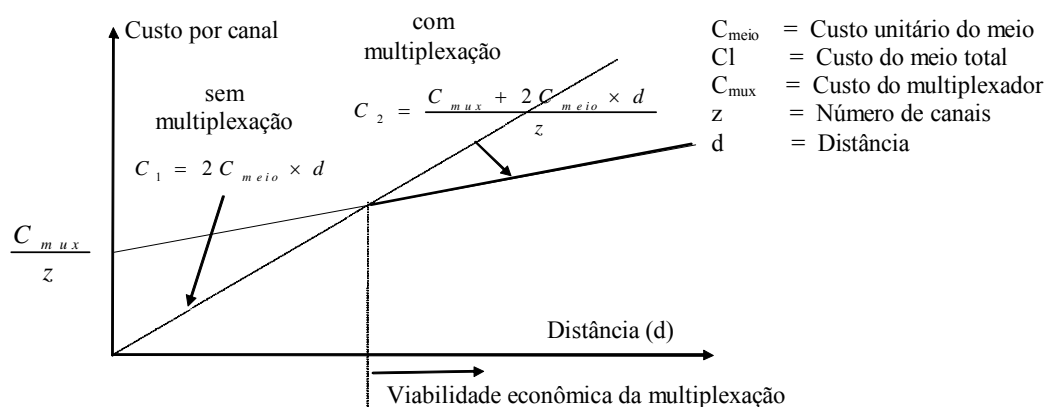


Figura 2.1 - Aspectos Econômicos do uso da Multiplexação.

2.2 Tipos de Multiplexação

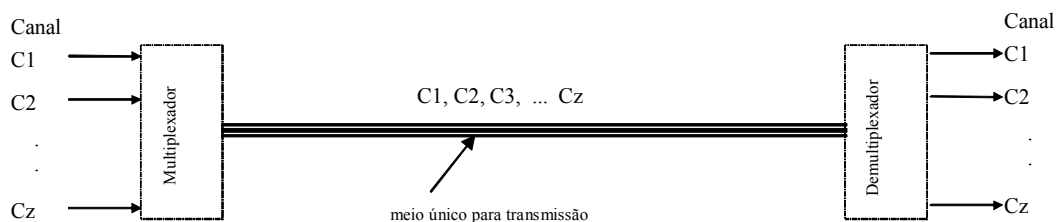


Figura 2.2 - Princípio de multiplexação.

Existem basicamente três tipos de multiplexação, que são a multiplexação por divisão do espectro de freqüências, a multiplexação por divisão do tempo e a multiplexação por divisão de comprimento de onda.

2.2.1 Multiplexação por divisão de freqüências (FDM)

Na multiplexação por divisão de freqüências é designada uma faixa de freqüência para cada canal. O sinal deve ser deslocado em freqüência para sua posição antes de ser realizada a multiplexação dos canais. O deslocamento do canal até uma posição específica do espectro de freqüências é feito através de um processo de modulação. Este processo deve ser feito de tal forma que o sinal modulado não interfira em outros canais multiplexados.

A multiplexação FDM é basicamente uma *separação em freqüência* dos z canais a serem multiplexados, resultando em uma *sobreposição no tempo* dos sinais.

Em telefonia, a FDM é implementada através de modulação AM - SSB, sendo designada uma faixa de 4 kHz para cada canal telefônico (300 a 3400 Hz).

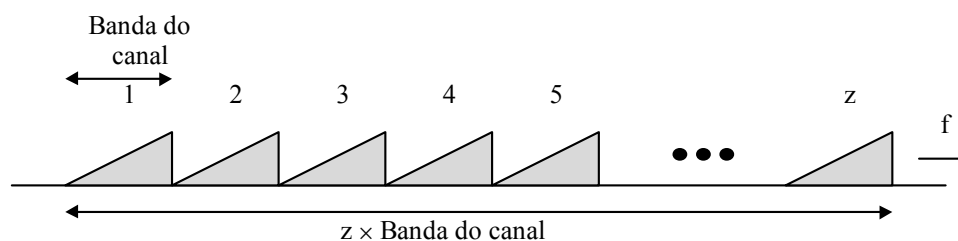


Figura 2.3 - Multiplexação por Divisão de Freqüências.

2.2.2 Multiplexação por divisão de tempo (TDM)

Na multiplexação por divisão de tempo os z canais digitais (amostrados e codificados em PCM) são intercalados periodicamente. A criação do sinal TDM é feita através da amostragem sincronizada de diversos canais, sendo que os pulsos de cada canal são deslocados no tempo em relação aos outros.

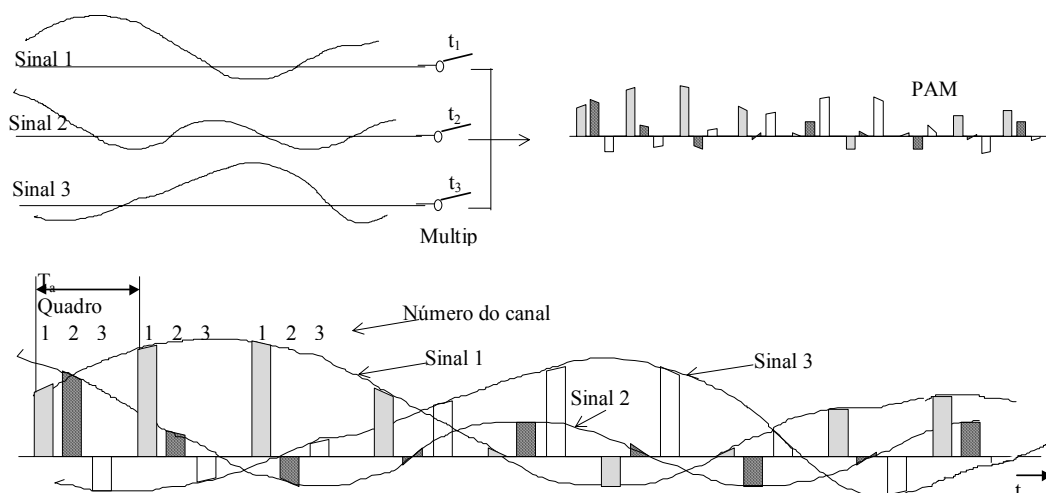


Figura 2.4 - Multiplexação por Divisão de Tempo com modulação PAM.

Os z canais distribuídos no tempo formam um quadro (*frame*) cuja duração deve ser igual ao período de amostragem (T_a).

O tipo de modulação por pulsos a ser utilizada pode ser analógica (PAM, PWM, PPM) ou digital (PCM).

Na multiplexação TDM, os canais ficam separados no tempo e sobrepostos em frequência.

Como o tempo é um valor relativo, a TDM necessita de um ponto de referência no quadro, para que o receptor possa ser sincronizado em frequência e fase de forma a poder extrair o sinal correspondente a cada canal. Este sincronismo é obtido pela envio periódico de um sinal de referência.

2.2.3 Multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM)

A multiplexação por divisão de comprimento de onda é utilizada em sistema com fibras óticas, em conjunto com a multiplexação TDM, visando ampliar o

uso da fibra com taxas de transmissão maiores. Nesta multiplexação cada sinal TDM é transformado em um comprimento de onda diferente através de diodos LASER, e transmitido em uma única fibra. O número de comprimento de ondas multiplexadas utilizadas são 2λ , 4λ , 16λ , 40λ , 64λ sendo as taxas de TDM 2.5Gbit/s, 10 Gbit/s e 40 Gbit/s.

2.3 O espectro do sinal multiplexado.

No capítulo anterior, analisamos o espectro de um trem de pulsos e obtivemos uma série de impulsos nas frequências harmônicas da frequência de amostragem com a amplitude dada pela função de amostragem $AdSa(nd\pi)$. Do estudo da *Transformação de Fourier*, sabe-se pela *Propriedade do deslocamento* que o deslocamento de uma função $f(t)$ no tempo de t_0 , faz com que o espectro de amplitude $|F(w)|$ permaneça inalterado, e o seu espectro de fase é alterado de $-wt_0$.

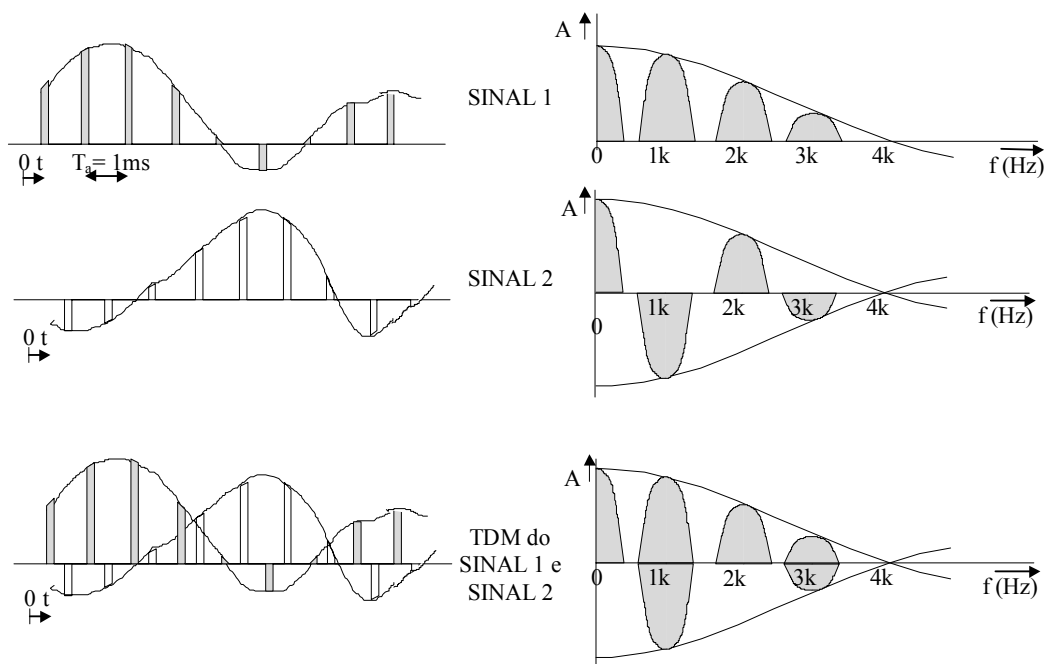


Figura 2.5 - Determinação do espectro de frequência de um sinal TDM.

No exemplo da Figura 2.5 é mostrada a multiplexação TDM das amostras de dois sinais. O sinal 1 é amostrado por um trem de pulsos com ciclo de trabalho $d = 0,25$ e período $T = 1\text{ms}$, e o sinal 2 por um trem de pulsos atrasado de $0,5\text{ms}$ em relação ao primeiro. Em ambos os casos, o espectro

de freqüência do sinal amostrado tem o mesmo módulo, porém a fase é diferente. Aplicando a Propriedade do deslocamento, podemos determinar que a fase do segundo sinal $\phi = 0$ para $n = 0, 2, 4, \dots$ e $\phi = \pi$ para $n = 1, 3, 5, \dots$. Como $\phi = \pi$ corresponde à inversão da polaridade do sinal, o espectro do segundo sinal pode também ser representado como tendo uma fase nula, e um espectro de amplitude com sinais alternados entre positivo e negativo, conforme é mostrado na Figura 2.5. A multiplexação TDM destes sinais é a soma dos sinais no tempo. O espectro do sinal TDM é obtido pela soma dos espectros dos sinais, desde que os sinais não possuam valores diferentes de zero ao mesmo tempo.

2.4 Parâmetros da multiplexação TDM/PCM.

A multiplexação TDM é geralmente utilizada em conjunto com a modulação PCM das amostras, possuindo os seguintes parâmetros:

- Taxa de transmissão global de bits (D)
- *Número de canais* multiplexados (z)
- *Estrutura do quadro* - seqüência em que os símbolos dos canais e símbolos auxiliares aparecem no tempo. Repete-se a cada período de amostragem

$$T_a = 1 / f_a (125 \mu s).$$

- *Parâmetros da modulação digital* - freqüência de amostragem f_a (8kHz), lei de quantização (Lei A ou μ), código (binário simétrico), número de níveis de quantização (256 níveis) e número de bits utilizados por canal n (8 bits).
- *Parâmetros de transmissão* - meio, modo de transmissão, taxa de símbolos (baud rate), probabilidade de erro, código de linha.

2.5 Vantagens e desvantagens da multiplexação TDM/PCM.

A principal vantagem do uso da TDM/PCM é a possibilidade de regenerar a informação transmitida durante a transmissão. Por isso, mesmo na presença de ruído pode-se assegurar uma excelente qualidade de transmissão, independente da distância da transmissão.

Outras vantagens da multiplexação TDM/PCM são: melhor uso da rede telefônica já instalada através do aumento no número de circuitos; maior facilidade de integração de circuitos, e melhor estabilidade quando comparado com o FDM; permitir a integração de diversos serviços (voz, imagem, dados, etc.) em uma Rede Digital de Serviços Integrados - RDSI¹; utilização da fibra ótica como meio de transmissão.

A grande desvantagem do TDM/PCM é a necessidade de uma largura de banda maior que nos outros sistemas. No entanto um sistema TDM/PCM pode utilizar um meio de transmissão com péssimas qualidades (atenuação, diafonia, ruído) desde que o tenha largura de banda suficiente. A largura de banda (B) necessária para transmitir a uma taxa de bits (D) para fins práticos é dada pela equação:

$$B = 0.8 \times D$$

Como exemplo, na transmissão de voz em um sistema analógico é necessário uma largura de banda de 3100 Hz, enquanto que para a transmissão digital da voz a largura de banda necessária é de 51 kHz.

À medida que são multiplexados mais canais de voz através de TDM, os pulsos que transmitem as amostras ficam mais estreitos, aumentando assim a largura da banda necessária. Se tivermos 32 canais de 64 kbit/s multiplexados, será necessária no mínimo uma largura de banda de 1.6 MHz.

¹ ISDN - Integrated Service Digital Network

2.6 Estrutura Física de um sistema de transmissão TDM/PCM

Um sistema TDM/PCM típico ligado a dois pares de fios trançados (ou cabos coaxiais) é composto dos seguintes módulos:

- *Equipamento Terminal:* está situado nos dois extremos da linha, tem a função de realizar a multiplexação e demultiplexação por divisão de tempo dos canais TDM. Além disso, realiza as funções de interface como: sinalização, adaptação de níveis de tensão, adaptação de impedância, monitoração, sincronização e alimentação.
- *Equipamento de Linha ou Regenerador:* está distribuído ao longo da linha em intervalos regulares, e tem a função de regenerar o sinal que carrega a informação.

Os sistemas TDM/PCM usam sempre circuitos a quatro fios, sendo dois fios para a transmissão do sinal TDM/PCM e dois fios para a recepção.

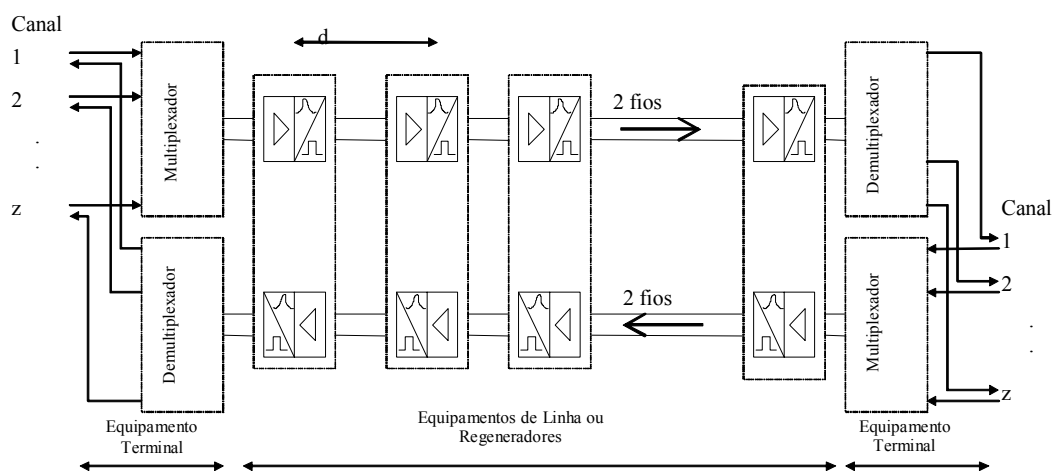


Figura 2.6 - Estrutura Física do TDM/PCM.

2.7 Estrutura lógica do sistema TDM/PCM

2.7.1 Organização do Quadro

Cada canal digital em um sistema TDM/PCM utiliza o mesmo número de bits b que correspondem à amostra codificada ou parte de uma mensagem digital. Ao conjunto de bits ou bit isolado destinado a cada canal denominamos de

intervalo de tempo de canal ITC ou *timeslot*. A repetição dos grupos de b bits pertencentes a cada canal ocorre após um período de amostragem T_a , de forma que a taxa de transmissão de bits por canal é dada pela equação:

$$\text{Taxa de transmissão de bits por canal} = \frac{b}{T_a}$$

No caso do PCM telefônico, temos oito bits por canal e uma frequência de amostragem de 8kHz. Portanto a taxa de transmissão de bits é de 64000 bits/s (64 kbit/s).

Quando os z canais são multiplexados na forma TDM, o conjunto das z palavras de b bits acrescido dos bits auxiliares, constitui um *quadro*. Em telefonia, a duração de um quadro é 125 μ s.

A organização do quadro determina a forma como os bits dos canais e bits auxiliares são distribuídos:

- *Intercalação de Palavras*: neste caso o quadro é dividido em z *timeslot*, onde cada *timeslot* contém os b bits de cada canal. A multiplexação é feita através do envio de uma palavra de cada canal.
- *Intercalação de Bits*: O quadro é dividido em b grupos sendo que cada um contém z bits. Cada grupo contém um bit de cada canal. A multiplexação é feita através do envio de um bit de cada canal.

A intercalação de palavras ocorre nos sistemas PCM primários, uma vez que está disponível separadamente o conjunto de oito bits referentes a cada canal. Nos sistemas TDM de ordem superior geralmente é usada uma intercalação de bits, uma vez que seus tributários são considerados como sendo um fluxo contínuo de bits.

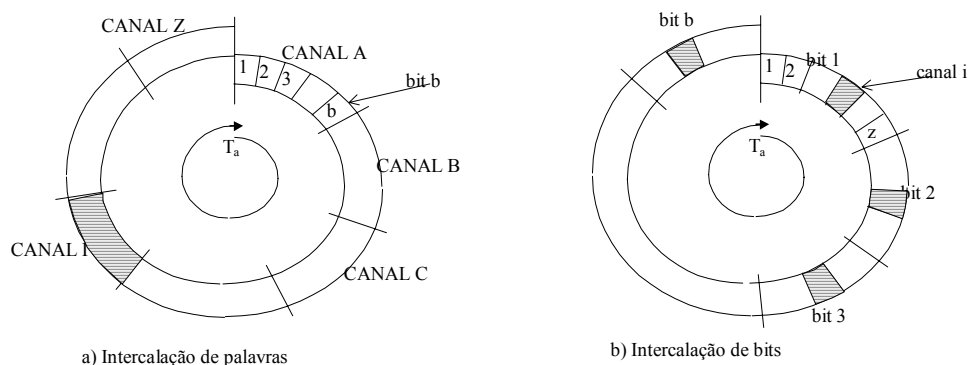


Figura 2.7 - Estruturas de quadro.

2.7.2 Alinhamento do Quadro

O alinhamento do quadro é uma operação que consiste em sincronizar o receptor em frequência e fase com os ciclos de símbolos recebidos. Esta operação deve ser realizada cada vez que o receptor é ligado, e periodicamente para detectar eventuais perdas de sincronismo.

Para criar a referência de tempo necessária para sincronização do quadro, é utilizado um padrão de bits que se repete periodicamente no quadro.

As principais considerações na escolha do procedimento e padrões de alinhamento são: o tempo necessário para estabelecer o alinhamento; os efeitos de erros nos canais sobre a manutenção do alinhamento; a imunidade do padrão a imitações por deslocamento no tempo dos bits; o número de bits acrescentados na transmissão; a complexidade do circuito de alinhamento.

Os erros no padrão de alinhamento são utilizados como forma de monitorar o desempenho da transmissão. Quando o número de erros ultrapassa certo limite estabelecido é disparada uma condição de alarme.

A perda do alinhamento pode ser causada por: perda de sincronismo do relógio local com o relógio da linha, causando perda ou duplicação de bits; erros de bits criando falsas perdas de sincronismo.

O procedimento de alinhamento deve garantir que a ocorrência de uma falsa perda de alinhamento não seja interpretada como perda de alinhamento.

Quando o receptor perde o alinhamento de quadro, as informações transmitidas em todos os canais são perdidas, até que seja novamente feito o alinhamento.

Em relação ao modo como o padrão está localizado no quadro, ele pode ser:

- *Padrão de bits agrupados*: o padrão de alinhamento é um conjunto de v bits consecutivos no começo do quadro.
- *Padrão de bits distribuídos*: o padrão de alinhamento é um conjunto de bits que aparecem a intervalos regulares de tempo dentro de um quadro ou em diversos quadros sucessivos.

Uma forma alternativa de se conseguir alinhar o quadro é através da violação do código de linha empregado, permitindo uma rápida identificação dos limites do quadro. Uma das vantagens deste método é que o padrão de alinhamento não pode ser produzido pelas informações transmitidas. Desta forma o alinhamento ocorre imediatamente após o recebimento do padrão de alinhamento, bem como a perda do alinhamento é percebida imediatamente.

2.7.3 Sinalização

A sinalização tem por objetivo transmitir as informações auxiliares de uma estação comutadora para outra estação comutadora, de modo a controlar a comutação e possibilitar o gerenciamento da rede.

A sinalização utilizada nos sistemas TDM/PCM pode ser feita das seguintes formas:

- *Sinalização por MFC*: (para sinalização entre registradores - CAS²) A mesma utilizada no sistema analógico, só que neste caso os sinais são convertidos em digitais pelos Codecs.
- *Sinalização no byte, canal por canal ("roubo de bits")*: (para sinalização de linha - CAS) o bit menos significativo da palavra PCM é periodicamente reservado para a sinalização, resultando em uma degradação imperceptível na qualidade da transmissão telefônica, mas em uma restrição muito grande para a transmissão de dados.
- *Sinalização fora do byte, canal por canal*: (para sinalização de linha - CAS) Cada canal possui além dos bits da palavra PCM, mais um ou vários bits para a sinalização, sendo que estes bits de sinalização podem estar distribuídos ou agrupados.
- *Sinalização por canal comum*: (para sinalização de linha e entre registradores - CCS³) um conjunto de bits é reservado para a sinalização formando um canal de comunicação de dados. O canal de dados é utilizado de acordo com a necessidade por todos os canais. A sinalização

² CAS – Sinalização Associada ao Canal

³ CCS – Sinalização por Canal Comum

é feita através de mensagens rotuladas, onde o rótulo indica o canal a qual a mensagem pertence. Este tipo de sinalização é muito adequado para a transmissão direta de informações auxiliares entre os processadores de centrais CPA.

2.8 Sistemas PCM de 1ª Ordem

Os sistemas de transmissão digital utilizados em telefonia são todos derivados hierarquicamente de dois sistemas básicos de 1ª ordens, que são o PCM24 e PCM30.

2.8.1 Sistema PCM24 (ITU-T G.733/706)

Este sistema é utilizado no Japão, nos EUA e em todos os países cujo código internacional é um, sendo também conhecido como sistema J1, T1 ou sistema de 1.5M. Ele permite transmitir simultaneamente 24 canais de 64kbit/s, podendo ser canais de dados ou voz. Os canais de voz são amostrados a 8kHz, utilizando a lei de compaixão μ com 8 bits para a codificação das palavras PCM. Também existe a possibilidade de transmitir 48 canais de 32kbit/s (G.726) através do PCM24.

No PCM24 os canais são combinados através da intercalação de palavras, formando uma seqüência ininterrupta de 192 bits. Para a formação do quadro é adicionando um bit F no começo da seqüência. O bit adicional F é utilizado para a transmissão do padrão de alinhamento de quadro e multiquadro (PAQ e PAMQ). Ao todo o quadro possui 193 bits, resultando em uma taxa de transmissão global de 1544 kbit/s (1,5 Mbit/s).

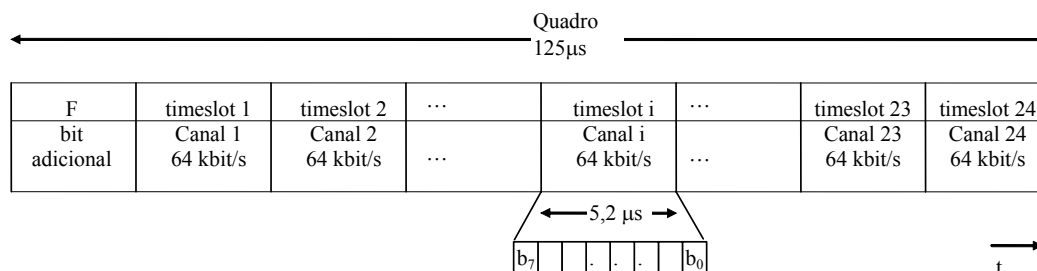


Figura 2.8 - Estrutura do quadro do PCM24

Para a formação do multiquadro existem duas possibilidades. Pode ser usada uma estrutura formada por 12 quadros numerados de Q_1 a Q_{12} que completam todas os bits de sinalização (a, b) e palavra de alinhamento de quadro e multiquadro (*Super Frame*), ou então uma estrutura formada por 24 quadros numerados de Q_1 a Q_{24} que completam todos os bits de sinalização (a, b, c, d), palavra de alinhamento, CRC e canal de dados (*Extended Super Frame*).

No primeiro caso o PAQ (101010) é transmitido no bit adicional dos quadros ímpares ($Q_1, Q_3, Q_5 \dots$), enquanto que o PAMQ (001110) é transmitido nos quadros pares ($Q_2, Q_4, Q_6 \dots$). Para alinhar o quadro e multiquadro é necessário examinar seis bits separados de 386 bits uns dos outros, tornando a tarefa de alinhamento bastante complexa. O tempo máximo para encontrar o alinhamento no caso do *Super Frame* é de 50 ms, enquanto que no *Extended Super Frame* é de 15 ms.

Quadro	Uso do bit adicional x		Uso dos bits dos timeslots 1 a 24	
	Palavra de alinhamento de quadro	Palavra de alinhamento de multiquadro	Canal 64kbit/s	Canal de sinalização de linha
Q_1	1	-	$b_0 \dots b_7$	-
Q_2	-	0	$b_0 \dots b_7$	-
Q_3	0	-	$b_0 \dots b_7$	-
Q_4	-	0	$b_0 \dots b_7$	-
Q_5	1	-	$b_0 \dots b_7$	-
Q_6	-	1	$b_1 \dots b_7$	$b_0 \rightarrow$ canal a
Q_7	0	-	$b_0 \dots b_7$	-
Q_8	-	1	$b_0 \dots b_7$	-
Q_9	1	-	$b_0 \dots b_7$	-
Q_{10}	-	1	$b_0 \dots b_7$	-
Q_{11}	0	-	$b_0 \dots b_7$	-
Q_{12}	-	0	$b_1 \dots b_7$	$b_0 \rightarrow$ canal b

Figura 2.9 - Estrutura do multiquadro do PCM24 (Super Frame)

Para a sinalização de alarme de perda de alinhamento, pode ser utilizado o bit adicional (bit $x = 1$) do último quadro (Q_{12}), ou através da mudança do segundo bit de todos os canais de voz para 0.

Para a sinalização de linha de cada canal adota-se a técnica da sinalização no byte, sendo que, a cada seis quadros (Q_6 e Q_{12}) utiliza-se o bit menos

significativo (b_0) de cada canal, para a transmissão da informação dos canais de sinalização a e b da através de codificação digital R2.

Com a redução do número médio de bits por canal de 8 para $7 \frac{5}{6}$, existe uma perda de qualidade no sinal de voz, que correspondente a -1.8dB na relação sinal/ruído, além de impossibilitar o seu uso na transmissão de dados a 8 bits.

Nos casos em que é utilizada a sinalização por canal comum, a estrutura do multiquadro desaparece, e o bit auxiliar dos quadros pares forma um canal de dados de 4 kbit/s. O uso da sinalização de canal comum faz com que os canais de voz passam a ter sempre 8 bits, melhorando a qualidade do sinal de voz.

2.8.2 Sistema PCM30 (ITU-T G732/706)

Este sistema é utilizado na Europa, América do Sul, na maioria dos países incluindo os enlaces internacionais, sendo conhecido como sistema CEPT1, E1 ou 2M. 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 a 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 (*timeslot* 0 e 16) para as funções de alinhamento e sinalização, de forma que o quadro possui 256 bits, resultando em uma taxa de transmissão global de 2048 kbit/s (2 Mbit/s).

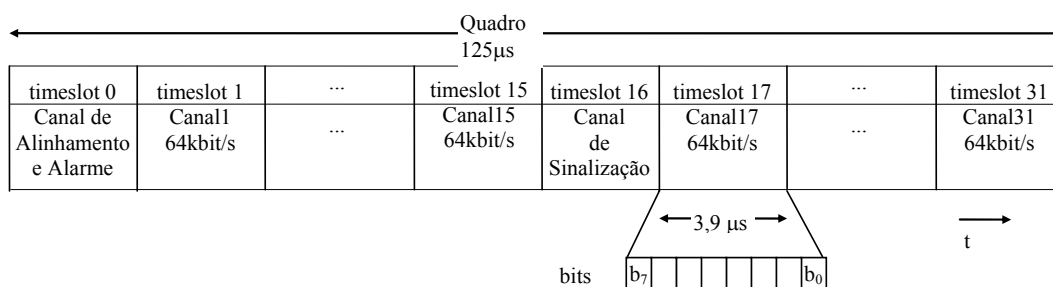


Figura 2.10 - Estrutura do quadro do PCM30

A estrutura de multiquadro é um conjunto de 16 quadros numerados de Q_0 a Q_{15} , dentro da qual podemos observar as seguintes características:

- A palavra de alinhamento de quadro (PAQ = “0011011”) são os bits $b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6 b_7$ do *timeslot 0* dos quadros pares Q_0, Q_2, Q_4, \dots
- A palavra de alinhamento de multiquadro (PAMQ = “0000”) são os bits $b_0 b_1 b_2 b_3$ do *timeslot 16* do quadro Q_0 .
- Alarme de perda de alinhamento do multiquadro é o b_5 do *timeslot 16* do quadro Q_0 .
- A palavra de serviço é formada pelos bits $b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6 b_7$ do *timeslot 0* dos quadros ímpares Q_1, Q_3, Q_5, \dots . O bit b_1 da palavra de serviço é fixado em 1 para evitar a simulação da PAQ. O bit b_2 é utilizado para indicar alarme remoto, 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 2.048 kbit/s, erro do sinal de alinhamento de quadro superior a 10^{-3} .
- A sinalização de linha é transmitida nos 8 bits do *timeslot 16* dos quadros Q_1 a Q_{15} . O significado dos bits muda conforme o número do quadro, sendo que no quadro Q_i os bits $b_0 b_1 b_2 b_3$ correspondem à sinalização de linha do *canal telefônico i* e os bits $b_4 b_5 b_6 b_7$ correspondem ao *canal telefônico i+15*.
- O bit b_0 do *timeslot 0* assinalado com R é reservado para uso internacional, e para transmissão de CRC-4, enquanto os bits assinalados com X são reservados para uso nacional. Os bits X do *timeslot 16* do quadro Q_1 são bits de reserva e o bit Y é utilizado para alarme de multiquadro remoto.

No caso do uso da sinalização de canal comum, a estrutura de multiquadro desaparece e o *timeslot 16* passa a ser utilizado como um canal de dados de 64 kbit/s. Na sinalização de canal comum, além da sinalização de linha são transmitidas outras informações tais como: a seleção numérica, dados de tráfego, roteamento, otimizando assim o uso do *timeslot 16*. Caso não seja necessário utilizar o *timeslot 16* para sinalização de canal comum, ele pode ser utilizado para a transmissão de um canal de 64kbit/s de voz ou dados.

No PCM30 o procedimento de alinhamento de quadro utilizado é mostrado na Figura 2.12. Pode se observar um atraso na confirmação da perda do

alinhamento, pois é considerado somente após três ausências sucessivas do PAQ. A confirmação do alinhamento é feita pela presença do bit ($b_1=1$) no *timeslot 0* do quadro que segue ao que tinha o PAQ. Quando ocorre a perda do alinhamento de quadro o equipamento terminal do lado oposto é informado através do bit de alarme urgente *A* ($b_2=1$). Normalmente são necessários 500 μ s para realinhar o quadro.

Quadro	Uso dos bits do <i>timeslots 0</i>							Uso dos bits do <i>timeslots 16</i>							Uso dos <i>timeslots 1...15 e 17...31</i> Canal de voz																
	Palavra de alinhamento de quadro							Palavra de Serviço								Canal de sinalização de linha															
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5		b_6	b_7	a	b	c	d	a	b	c	d	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
Q ₀	R	0	0	1	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	X	A	X	X	$b_0 \dots b_7$					
Q ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	R	1	A	X	X	X	X	X	X	canal 1	-	-	-	-	-	-	-	canal 16	$b_0 \dots b_7$				
Q ₂	R	0	0	1	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	canal 2	-	-	-	-	-	-	-	canal 17	$b_0 \dots b_7$				
Q ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	R	1	A	X	X	X	X	X	X	canal 3	-	-	-	-	-	-	-	canal 18	$b_0 \dots b_7$				
Q ₄	R	0	0	1	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	canal 4	-	-	-	-	-	-	-	canal 19	$b_0 \dots b_7$				
Q ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	R	1	A	X	X	X	X	X	X	canal 5	-	-	-	-	-	-	-	canal 20	$b_0 \dots b_7$				
Q ₆	R	0	0	1	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	canal 6	-	-	-	-	-	-	-	canal 21	$b_0 \dots b_7$				
Q ₇	-	-	-	-	-	-	-	-	R	1	A	X	X	X	X	X	X	canal 7	-	-	-	-	-	-	-	canal 22	$b_0 \dots b_7$				
Q ₈	R	0	0	1	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	canal 8	-	-	-	-	-	-	-	canal 23	$b_0 \dots b_7$				
Q ₉	-	-	-	-	-	-	-	-	R	1	A	X	X	X	X	X	X	canal 9	-	-	-	-	-	-	-	canal 24	$b_0 \dots b_7$				
Q ₁₀	R	0	0	1	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	canal 10	-	-	-	-	-	-	-	canal 25	$b_0 \dots b_7$				
Q ₁₁	-	-	-	-	-	-	-	-	R	1	A	X	X	X	X	X	X	canal 11	-	-	-	-	-	-	-	canal 26	$b_0 \dots b_7$				
Q ₁₂	R	0	0	1	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	canal 12	-	-	-	-	-	-	-	canal 27	$b_0 \dots b_7$				
Q ₁₃	-	-	-	-	-	-	-	-	R	1	A	X	X	X	X	X	X	canal 13	-	-	-	-	-	-	-	canal 28	$b_0 \dots b_7$				
Q ₁₄	R	0	0	1	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	canal 14	-	-	-	-	-	-	-	canal 29	$b_0 \dots b_7$				
Q ₁₅	-	-	-	-	-	-	-	-	R	1	A	X	X	X	X	X	X	canal 15	-	-	-	-	-	-	-	canal 30	$b_0 \dots b_7$				

Figura 2.11 - Estrutura do multiquadro do PCM30

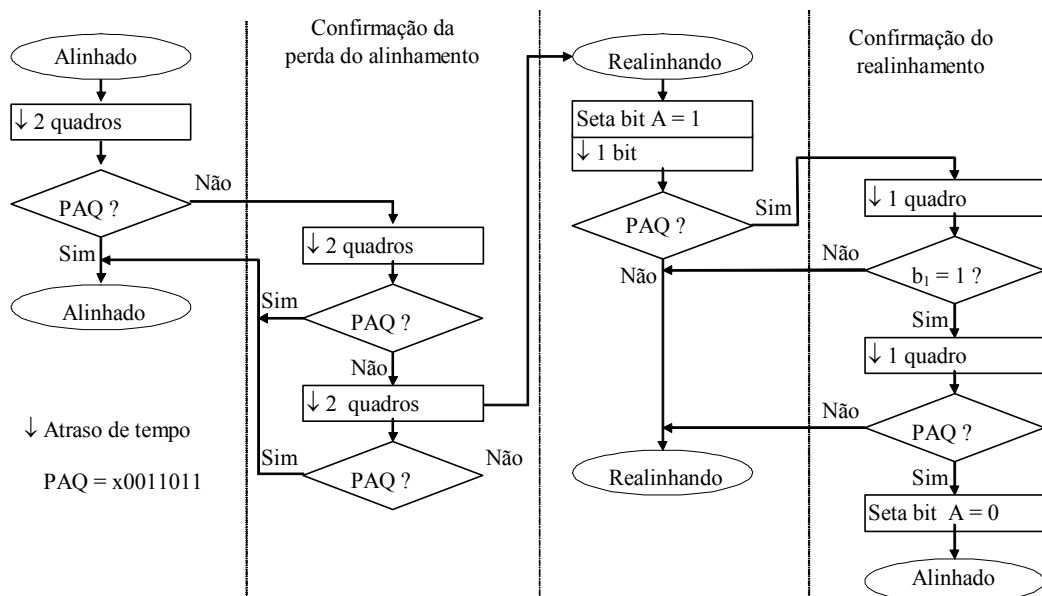


Figura 2.12 - Procedimento de alinhamento no PCM30

2.8.3 Comparação dos sistemas PCM de 1ª ordem.

Os sistemas baseados no PCM24 foram os primeiros a serem utilizados e tinham como objetivo principal a maximização da taxa de bits útil. O sistema PCM30 foi desenvolvido visando eliminar os problemas que o PCM24 apresentava.

Comparando os dois sistemas percebem-se as seguintes vantagens do PCM30 sobre o PCM24:

- Melhor desempenho na frequência de voz, uma vez que os canais telefônicos possuem 8 bits, enquanto que no PCM24 existem em média apenas $7\frac{5}{6}$ bits.
- Maior rapidez no realinhamento do quadro, uma vez que o PAQ é recebido agrupado a cada $500\ \mu\text{s}$ no PCM30.
- Uma taxa de transmissão 16 vezes superior a do PCM24 na sinalização por canal comum.
- Melhor compatibilidade com as taxas de bits das centrais de comutação digital (2M e 8Mbit/s).
- Melhor utilização da capacidade dos cabos, resultando em um aumento de 25% no número de canais de voz nos mesmos cabos.

Características Específicas	PCM30	PCM24
Lei de Codificação/Decodificação	A= 87,6	$\mu = 255$
Segmentos utilizados na curva	13	15
Número de canais de voz	30	24
Quantidade de bits por quadro	$8 \times 30 + 8 \times 2 = 256$	$8 \times 24 + 1 = 193$
Tempo de duração do bit	$125\ \mu\text{s} / 256 = 488\ \text{ns}$	$125\ \mu\text{s} / 193 = 650\ \text{ns}$
Taxa de bits do sistema	$256 \times 8000 = 2048\ \text{kbit/s}$	$193 \times 8000 = 1544\ \text{kbit/s}$
Largura de banda do meio	$2048 \times 0.8 = 1.64\ \text{MHz}$	$1544 \times 0.8 = 1.24\ \text{MHz}$
Duração de um <i>timeslot</i>	$488 \times 8 = 3.9\ \mu\text{s}$	$650 \times 8 = 5.2\ \mu\text{s}$
Número de quadros por multiquadro	16	12
Duração de um multiquadro	$16 \times 125\ \mu\text{s} = 2\ \text{ms}$	$12 \times 125\ \mu\text{s} = 1.5\ \text{ms}$
Alinhamento do quadro	bits agrupados	bits distribuídos
Sinalização	fora do byte	no byte

Figura 2.13 - Características específicas dos sistemas PCM24 e PCM30

Características Comuns	PCM30 e PCM24
Frequência de amostragem:	8 kHz
Duração de um quadro:	125 μ s
Número de bits por palavra PCM:	8 bits
Taxa de transmissão por canal:	$8 \times 8000 = 64000 = 64$ kbit/s

Figura 2.14 - Características comuns dos sistemas PCM24 e PCM30

2.9 Hierarquia Digital Plesiócrons - PDH

Os sistemas PCM primários (PCM30 e PCM24) são apropriados para a transmissão telefônica digital, para pequenas distâncias com poucos canais de voz. Para distâncias maiores, passa a ser necessário agrupar um grande número de canais PCM em um único meio de transmissão, formando um sistema de ordem superior. O agrupamento dos sinais PCM pode ser utilizando uma das seguintes técnicas:

- *Multiplexador PCM*: o sinal digital multiplexado é obtido a partir da multiplexação TDM de vários sinais analógicos convertidos para PCM ou das próprias palavras PCM individuais.
- *Multiplexador Digital Plesiócrons (PDH)*: o sinal digital é obtido pela multiplexação TDM de vários sinais digitais que têm a mesma taxa nominal de transmissão de bits, mas podendo variar dentro de certos limites. O nome plesiócrons significa que os sinais de entrada dos multiplexadores digitais têm a mesma taxa nominal, mas o valor exato tem uma pequena tolerância, dada em partes por milhão (PPM).
- *Multiplexador Digital Síncrons (SDH)*: o sinal digital é obtido pela multiplexação TDM de vários sinais digitais que têm exatamente a mesma taxa de transmissão de bits.

Atualmente é comum o uso de SDH para taxas superiores a 140 Mbit/s, enquanto o PDH é apenas usado nas taxas inferiores a 140 Mbit/s, sendo geralmente um tributário de um sistema SDH.

Existem três hierarquias distintas, sendo uma para os sistemas baseados no sistema primário PCM30, e duas no PCM24, que são a Norte Americana e a Japonesa.

Para fins de estudo, utilizaremos apenas a hierarquia baseada no PCM30, que é empregada também no Brasil. Neste sistema, cada quadro é encabeçado por uma palavra de alinhamento de quadro para permitir a sincronização do receptor, existindo também posições definidas para transportar as informações de serviço (tele supervisão, alarmes, etc.).

Ordem	1	2	3	4
Número de tributários	-	4	7	6
Número de canais telefônicos	24	96	672	4 032
Taxa de transmissão de bits (kbit/s)	1 544	6 312	44 736	274 176
Tolerância (PPM)	50	30	20	10
Duração do bit (ns)	≈647	≈158	≈22	≈3.6
Tamanho do quadro (bits)	193	1176	4760	4704
Duração do quadro (μs)	≈125	≈186	≈106	≈17
Designação abreviada	1.5M	6M	45M	274 M
	(T1 ou DS1)	(T2 ou DS2)	(T3 ou DS3)	(T4 ou DS4)

Figura 2.15 - Características dos multiplex baseado no PCM24 (Norte Americano)

Ordem	1	2	3	4
Número de tributários	-	4	5	3
Número de canais telefônicos	24	96	480	1 440
Taxa de transmissão de bits (kbit/s)	1 544	6 312	32 064	97 728
Designação abreviada	1.5M (J1)	6M (J2)	32M (J3)	98M (J4)

Figura 2.16 - Características dos multiplex baseado no PCM24 (Japonês)

Ordem	1	2	3	4
Número de tributários	-	4	4	4
Número de canais telefônicos	30	120	480	1 920
Taxa de transmissão de bits (kbit/s)	2 048	8 448	34 368	139 264
Tolerância (PPM)	50	30	20	15
Duração do bit (ns)	≈488	≈118	≈29	≈7.2
Tamanho do quadro (bits)	256	848	1 536	2 928
Duração do quadro (μs)	125	≈100	≈44.7	≈21
Designação abreviada	2M (E1)	8M (E2)	34M (E3)	140M (E4)

Figura 2.17 - Características dos multiplex baseado no PCM30

Devido à diferença da taxa de transmissão que pode existir entre os tributários, o número de bits que chegam às entradas de um multiplex plesiócrono pode diferir de uma para outra entrada. Por este motivo, é necessário criar um mecanismo que permita compensar esta diferença de bits, pois caso contrário ocorreria perda ou duplicação de bits (SLIP). O processo que realiza esta compensação é chamado de justificação.

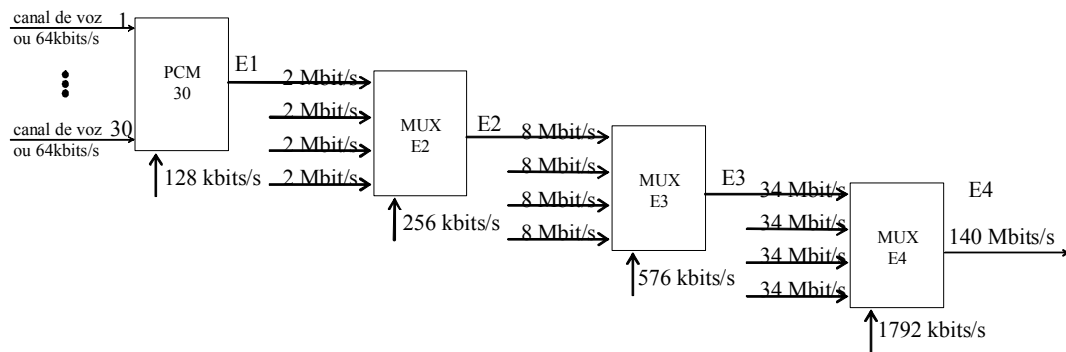


Figura 2.18 - Processo de multiplexação da hierarquia baseada no PCM30

2.9.1 Hierarquias Plesiócronicas e seus Pontos de Interface

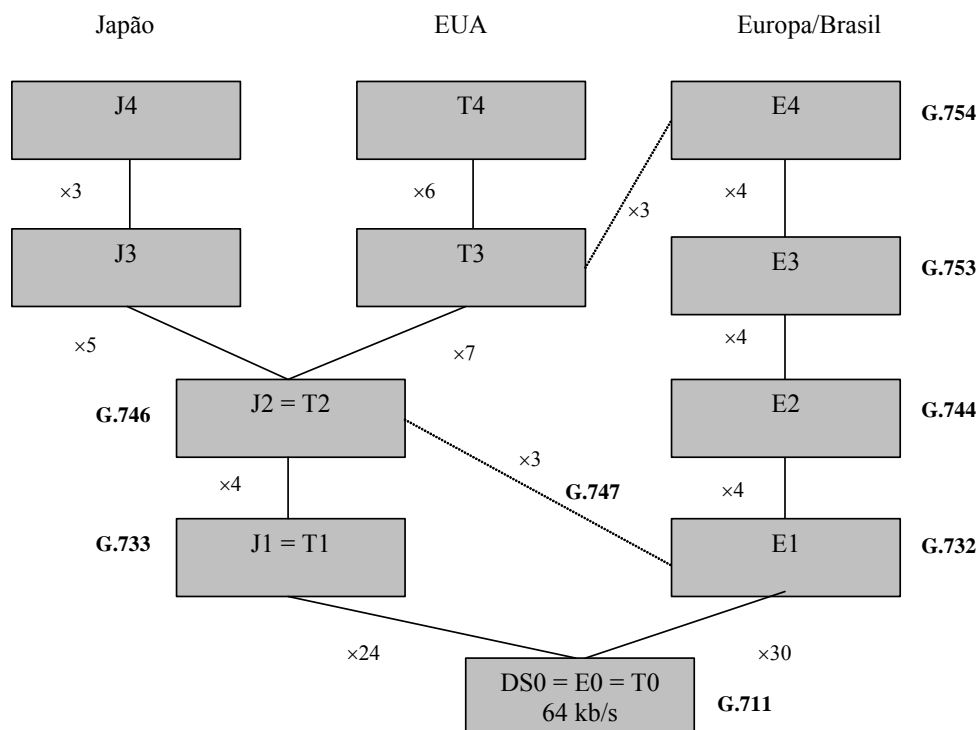


Figura 2.19 - Hierarquias Plesiócronicas

2.9.2 Processo de Justificação

O processo de justificação tem a função de acomodar a diferença entre a velocidade de escrita dos tributários e velocidade com que são lidas as informações pela saída do multiplex digital.

No processo de justificação, existem bits de controle que informam sobre a retirada ou acréscimo de bits de informação no quadro do sinal de saída.

Estes bits servem para que o receptor, ao demultiplexar o sinal, preserve todas as informações dos sinais multiplexados.

Existem dois processos básicos de justificação que são a positiva e a negativa, as quais podem ser utilizadas de forma isolada ou simultânea.

Tanto no caso do uso da justificação positiva como negativa, o tamanho do quadro não se altera nas situações em que foi feita a justificação.

A justificação negativa é feita quando a escrita dos bits é mais rápida do que a leitura dos bits do buffer de entrada do multiplex. Neste caso, existe a necessidade dar vazão aos bits a mais que chegam ao multiplex para que não haja perda de bits. Isto é feito através do uso de uma posição do quadro para cada entrada, onde é colocado um bit de informação a mais. Os bits de controle de justificação são utilizados para indicar se a justificação ocorreu, de forma que o demultiplexador saberá da existência do bit de informação a mais no quadro.

Por sua vez, a justificação positiva é feita quando a escrita dos bits é mais lenta do que a leitura dos bits. Neste caso, existe a necessidade de esperar até que novos bits cheguem ao multiplex, para evitar que um bit já transmitido para a saída seja repetido. Isto é feito através do uso de uma posição do quadro para cada entrada onde normalmente o bit de informação é escrito, quando é necessária a justificação esta posição é preenchida com um bit de enchimento (*stuffing bit*), que será desprezado na demultiplexação. Os bits de controle de justificação são utilizados para indicar que a justificação ocorreu, de forma que o demultiplexador saberá qual dos bits de justificação contém informações e quais são de enchimento.

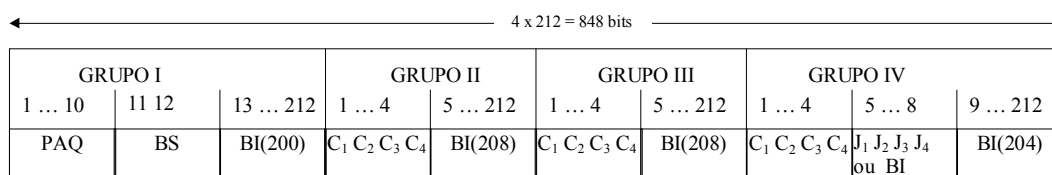
O momento em que deverá ser feita a justificação é detectado pela comparação da taxa de entrada de bits no buffer de cada entrada com a taxa de saída de bits. Uma vez verificada a necessidade de justificação, o código de justificação é transmitido, e em seguida, a justificação é feita.

O código de justificação é no mínimo triplicado, para evitar que um erro de um bit resulte na perda de sincronismo de todos os demultiplexadores dependentes. Para evitar que ruídos do tipo rajada afetem simultaneamente todos os bits de controle de justificação, estes são distribuídos ao longo do

quadro. A análise do código de justificação é feita por decisão majoritária, de modo que a presença de maioria de zeros (00x, 0X0 ou x00) indica que não houve justificação, enquanto a maioria de uns (11x, 1x1 ou x11) indica que a justificação foi feita.

2.9.3 Hierarquia Digital Plesiócrons Europeia

A multiplexação utilizada é feita através de intercalação de bits, de modo que o fluxo contínuo de bits dos tributários é distribuído ao longo do quadro.



PAQ = 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 - Padrão de Alinhamento de Quadro

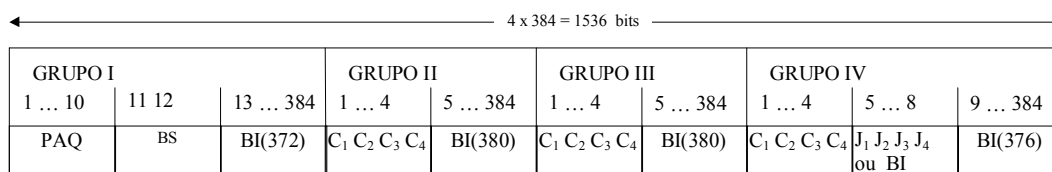
BS - Bits de Serviço

BI - Bits de Informação

C₁ C₂ C₃ C₄ - Bits de Controle de Justificação dos tributário 1, 2, 3 e 4

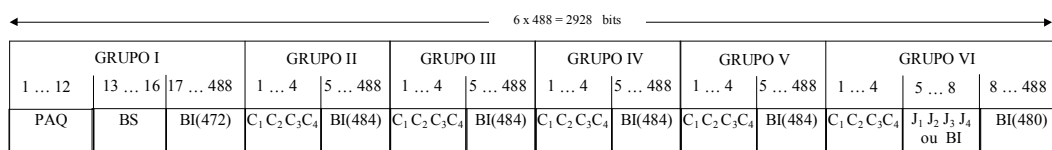
J₁ J₂ J₃ J₄ - Bits de Justificação dos tributário 1, 2, 3 e 4

Figura 2.20 - Quadro de 8 Mbit/s (ITU-T G.744)



PAQ = 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 - Padrão de Alinhamento de Quadro

Figura 2.21 - Quadro de 34 Mbit/s (ITU-T G.753)



PAQ = 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 - Padrão de Alinhamento de Quadro

Figura 2.22 - Quadro de 140 Mbit/s (ITU-T G.754)

O padrão de alinhamento de quadro utilizado tem 10 bits (ou 12 bits). O aumento no número de bits do PAQ visa tornar o alinhamento mais seguro, uma vez que a perda do alinhamento implica na perda das informações transmitidas em todos os canais.

O processo de justificação positiva é utilizado. Cada tributário possui 3 bits (ou 5 bits) de controle de justificação C_i . A existência de maioria de 1s no C_i do tributário indica que o seu bit de justificação correspondente J_i contém bits de enchimento. Caso contrário este bit conterá um bit de informação.

2.10 Hierarquia Digital Síncrona - SDH

Em virtude da crescente necessidade de maiores taxas de transmissão de bits nos enlaces de longas distâncias entre cidades, estados, países e continentes, e para possibilitar a implantação da RDSI de faixa larga, o ITU-T especificou a Hierarquia Digital Síncrona - SDH. Neste sistema, o requisito básico é de que todos os equipamentos estejam sincronizados entre si.

A multiplexação dos tributários síncronos (STM-1, STM-4, STM-16...) é feita sem que ocorra um aumento de bits, através da simples intercalação de bytes, de forma que a soma das velocidades dos tributários é igual à velocidade da saída do multiplex síncrono.

Uma característica importante da SDH é aceitar como tributários algumas das taxas de transmissão do PDH Norte Americano, Japonês, as taxas do PDH Europeu (ITU-T), as taxas do padrão SONET (*Synchronous Optical Network*), permitindo compatibilizar as diversas hierarquias plesiócronicas sem que seja necessário desmanchar os sinais multiplexados até o nível de 64 kbit/s. A compatibilização é feita através da transformação do quadro plesiócronicamente em um quadro síncrono ("container"). O container adapta através de um mapeamento os tributários de baixa ordem para que estes possam ser transportados na rede síncrona. Nos casos em que os tributários são assíncronos ou plesiócronicamente no mapeamento é feito também um processo de justificação de bit positiva/negativa semelhante a aquela feita na multiplexação dos sinais plesiócronicamente no PDH.

2.10.1 Mapeamento dos tributários PDH

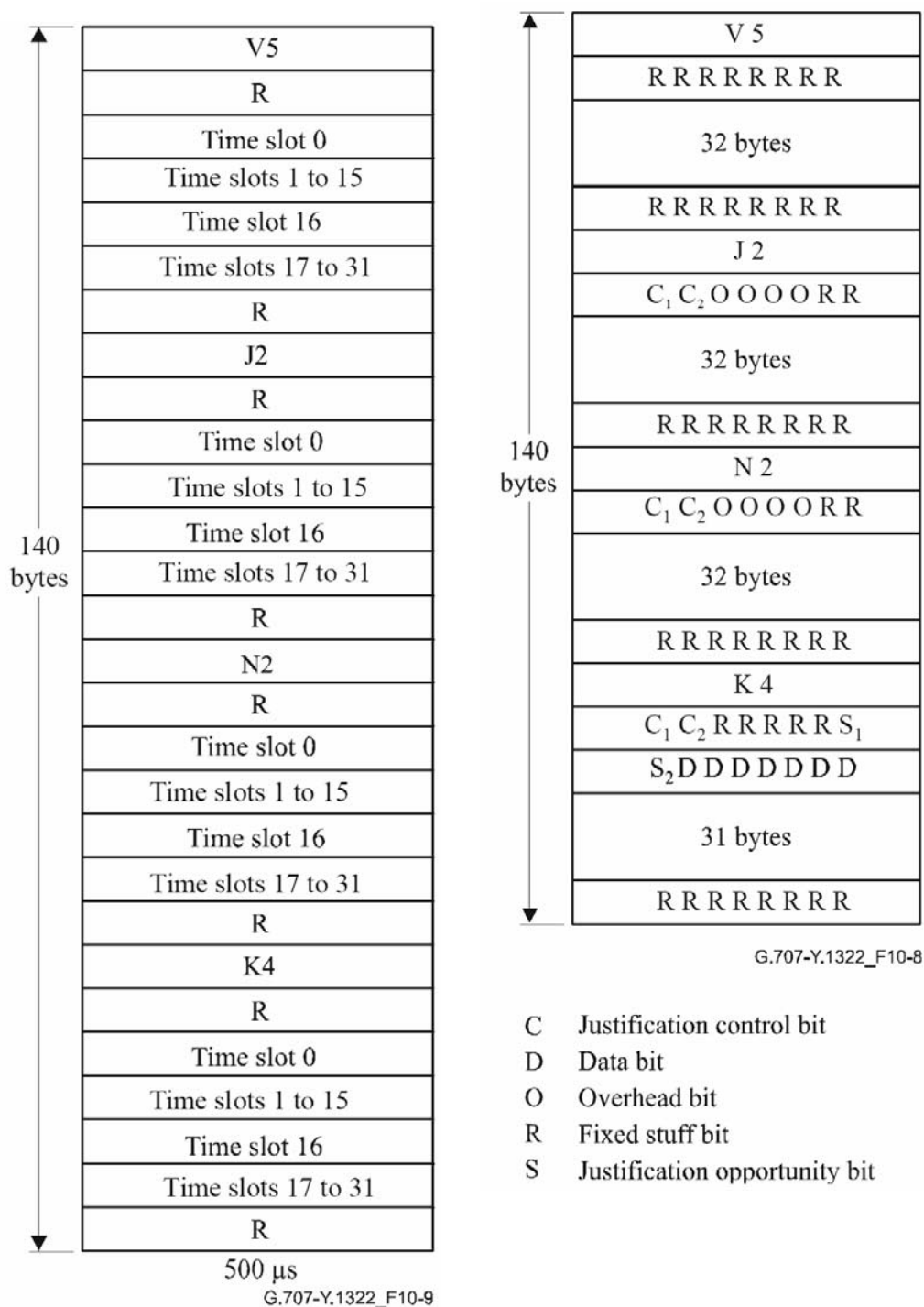


Figura 2.23 - Mapeamento dos tributários síncronos e assíncronos de 2.048 kbit/s no VC12 (ITU-T G.707)

A figura 2.33 mostra como é feito o mapeamento de um sinal de E1 no container virtual VC12, o qual é constituído de 140 bytes, tendo a capacidade de transmitir $4 \times 2048 \pm 1$ bit para tributários assíncronos, onde a variação do

número de bits é assegurada através dos bits de oportunidade de justificação positiva (S_2) e negativa (S_1). No caso de tributários síncronos a posição de cada *timeslot* é fixada e não há necessidade do mecanismo de justificação.

O conteúdo dos POH é dividido em 4 bytes V5, J2, N2 e K4, transmitidos a cada 125 μ s.

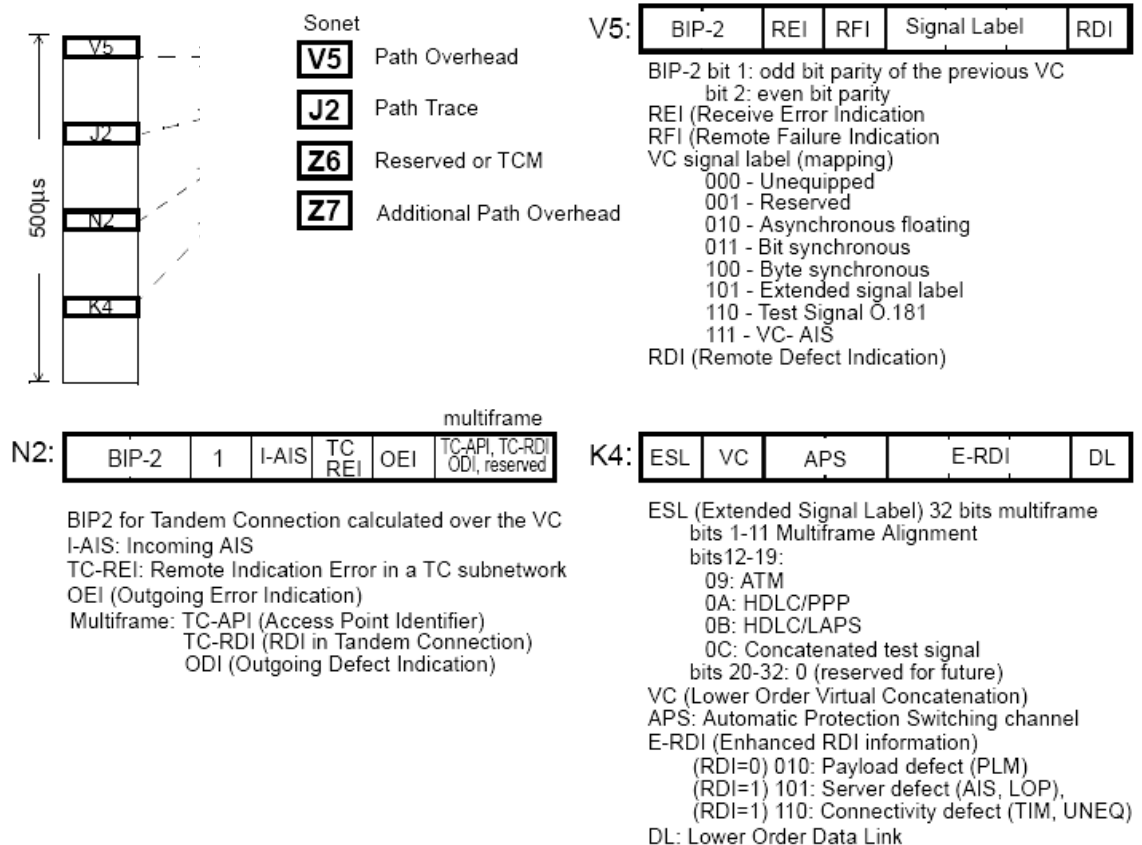


Figura 2.24 - Bytes do cabeçalho de caminho POH (ITU-T G.707)

Os containeres C11, C12, C2, C3 e C4 fazem o mapeamento inicial dos tributários de 1.5M, 2M, 8M, 34M e 140M respectivamente. Os containeres virtuais (VC) correspondem aos containeres acrescidos dos cabeçalhos de caminho (POH⁴).

2.10.2 Multiplexação dos tributários PDH

As Unidades tributárias (TU) correspondem aos VCs acrescidos de ponteiros que indicam a posição que os VCs irão ocupar na Unidade de Grupo. A

4 POH - Path Overhead

primeira multiplexação dos sinais é feita através da justaposição de uma até sete TUs, formando as Unidades de Grupo Tributárias (TUG). Uma segunda multiplexação é feita através da justaposição das TUG, formando um VC de ordem superior (VC4 e VC3), os quais acrescidos de um pointer passarão a formar as Unidades Administrativas (AU). Finalmente, uma última multiplexação é feita justapondo as AUs, formando a Unidade de Grupo Administrativo (AUG).

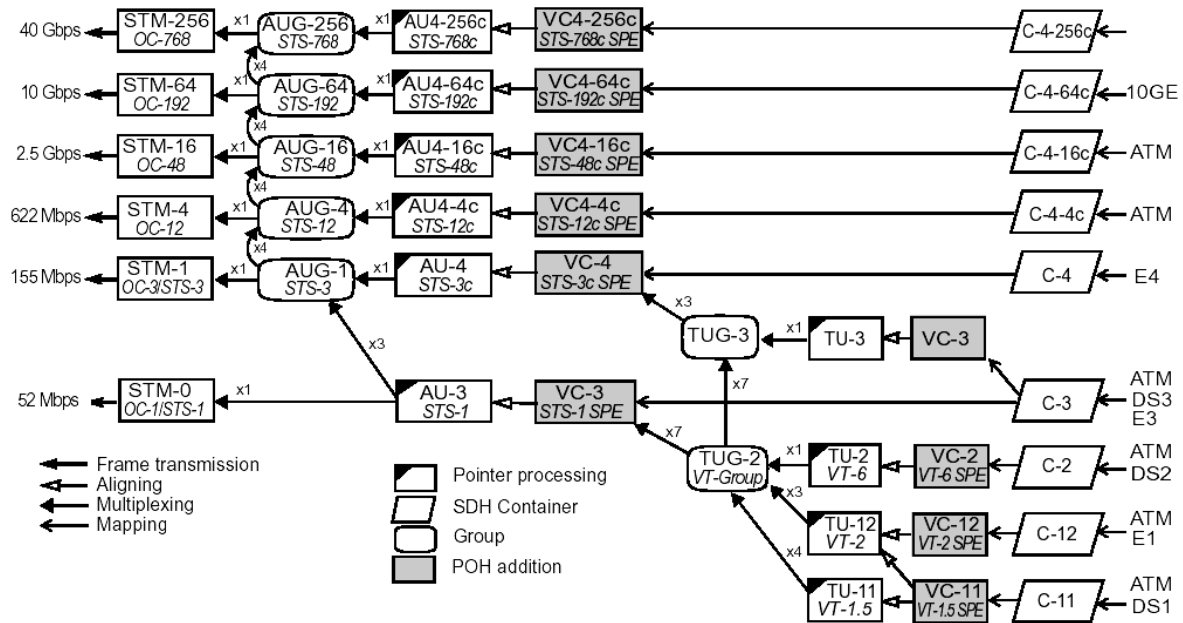


Figura 2.25 - Possibilidades de multiplexação dos tributários no SDH

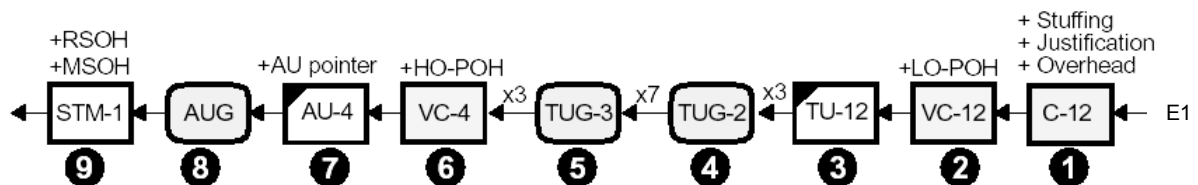


Figura 2.26 - Mapeamento e multiplexação do sinal E1 no STM-1

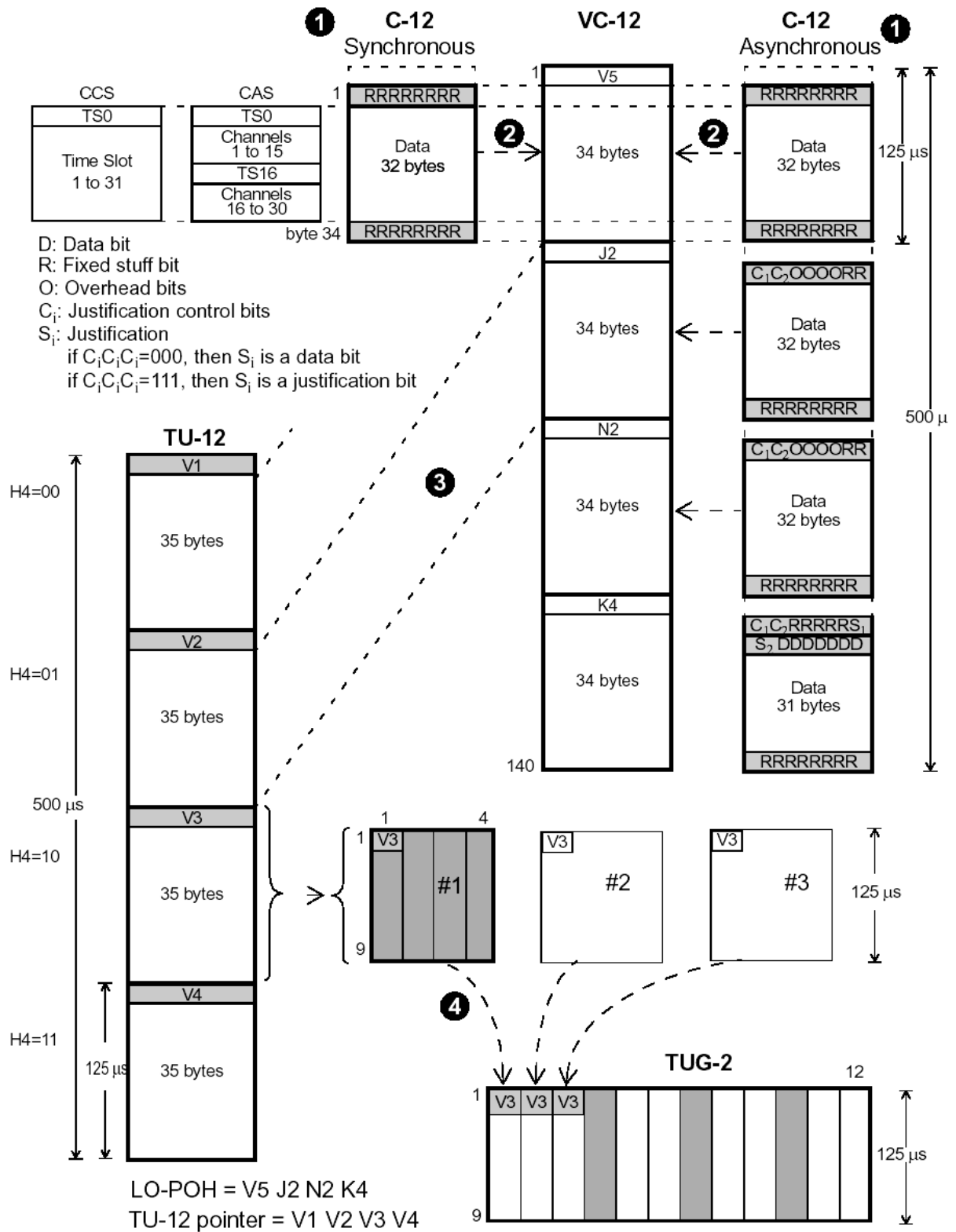


Figura 2.27 - Mapeamento e multiplexação do sinal E1 na TUG-2

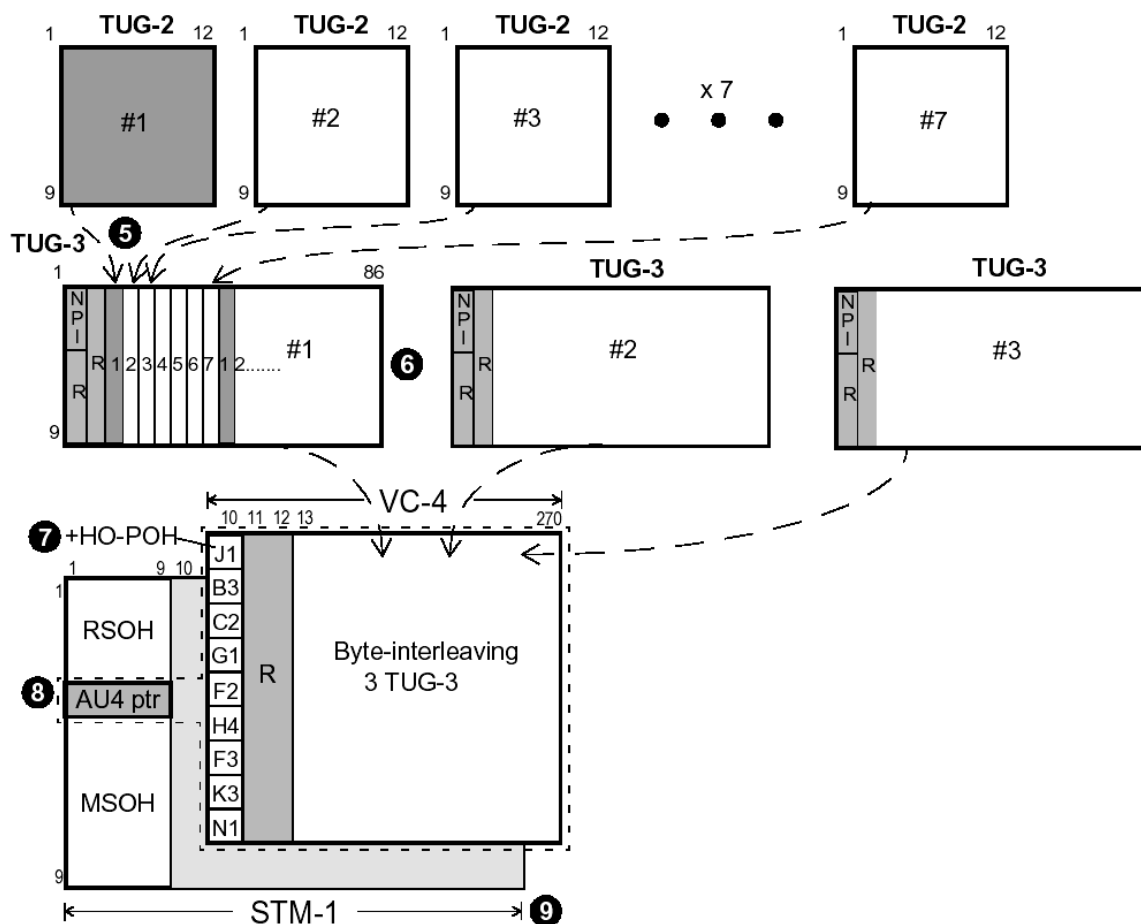


Figura 2.28 - Multiplexação das TUG-2 no STM-1

2.10.3 Quadro STM-1

O quadro básico do sistema SDH é o STM-1, composto de nove linhas de 270 bytes, sendo que os nove primeiros bytes de cada linha são destinados aos cabeçalhos de seção e aos ponteiros da AUs. O restante dos bytes de cada linha é destinado ao *Payload*⁵ de informação que contém uma AUG. A quantidade total de bits do quadro é de $270 \times 9 \times 8 = 19440$ bits, os quais se repetem a cada $125\mu\text{s}$ resultando em uma taxa de transmissão de bits de 155 520 kbit/s (156 M).

5 Payload - Espaço onde as informações dos tributários são transmitidas.

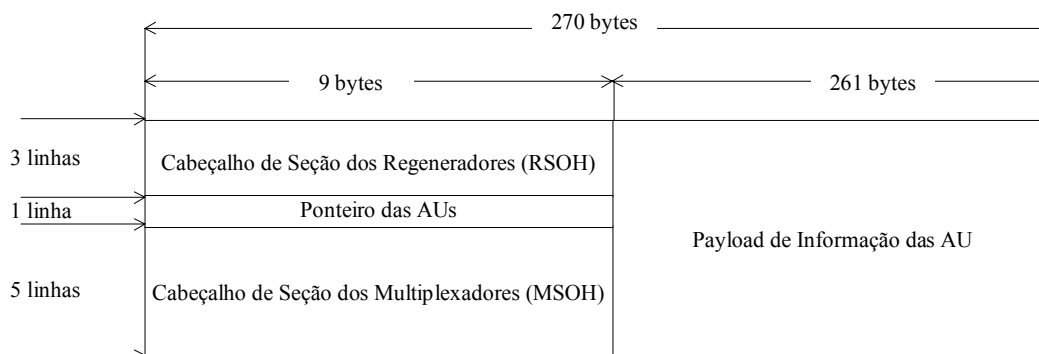


Figura 2.29 - Estrutura do quadro do STM-1

No STM-1 o cabeçalho de seção é dividido em duas partes que têm funções diferenciadas. O Cabeçalho de Seção dos Regeneradores (RSOH) contém as informações de alinhamento de quadro e outras informações utilizadas pelos regeneradores, enquanto o Cabeçalho de Seção dos Multiplexadores (MSOH) passa totalmente transparente pelos regeneradores, sendo utilizado para multiplexar e demultiplexar as AUs.

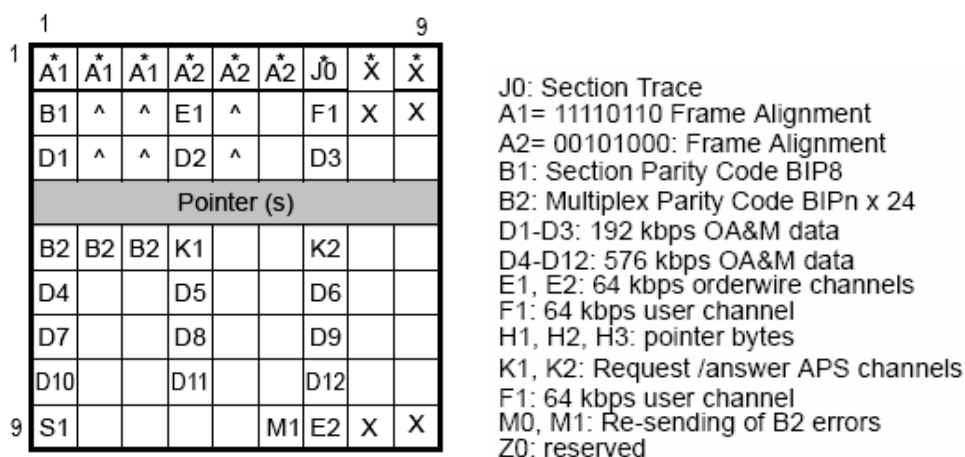


Figura 2.30 - Estrutura e significado dos bytes do SOH6 do STM-1

2.10.4 Quadro STM-N

A formação dos módulos de transporte síncrono (STM-N) ocorre através da intercalação de bytes de "N" AUGs e o acréscimo dos cabeçalhos de seção (SOH).

No caso dos módulos de transporte síncrono de ordem superior STM-4, STM-16, a estrutura básica é constituída pelas mesmas nove linhas, sendo que

cada linha possui $N \times 270$ bytes, que correspondem à intercalação de N estruturas STM-1 byte a byte. As taxas de transmissão destes módulos são, portanto: STM-4 = $4 \times \text{STM-1}$ = 622 080 kbit/s; STM-16 = $16 \times \text{STM-1}$ = 2 488 320 kbit/s.

Nível do SDH	Taxa de bits do SDH (kbit/s)
0	51 840
1	155 520
4	622 080
16	2 488 320
64	9 953 280
256	39 813 120

Figura 2.31 - Taxas de bit da hierarquia SDH.

2.10.5 Vantagens da SDH

Entre as principais vantagens da hierarquia digital síncrona podemos ressaltar:

- É um padrão mundial que permite a compatibilização das hierarquias plesiócronicas e síncronas existentes.
- Possui capacidade de transmissão suficiente para as futuras necessidades de transmissão.
- Possibilita o acesso direto aos tributários de baixas taxas de transmissão sem descer na hierarquia através da demultiplexação.
- Existe uma grande facilidade para aumentar as taxas de transmissão, devido à ausência de bits de justificação, utilizando-se exclusivamente da intercalação de bytes.
- É compatível com as técnicas de comutação ATM⁷.

2.11 Sincronização da Rede

Todos os sistemas digitais necessitam de uma fonte de frequência ou “relógio” para temporizar as operações internas e externas. Operações temporizadas

6 SOH - Section Overhead

7 ATM - Assynchronous Transfer Mode

por uma fonte única de frequência não requerem fontes especialmente estáveis, uma vez que todos os elementos temporizados sofrem as mesmas variações no tempo. No entanto, a situação é totalmente diferente quando existem transferências entre dois equipamentos síncronos. Mesmo que o relógio do terminal receptor esteja sincronizado ao terminal transmissor em longo-prazo, as variações de curto-prazo do relógio podem provocar danos a integridade dos dados transferidos.

A sincronização é necessária em um sistema de transmissão, para recuperar o relógio para amostrar os dados de entrada, e realizar o alinhamento para identificar os canais em um sinal TDM.

O sinal de relógio sempre possui certa instabilidade, sendo a instabilidade de frequência um dos aspectos mais importantes. A taxa em que a frequência do relógio muda pode ser rápida (*jitter*) ou lenta (*wander*)⁸. As principais fontes de instabilidade do relógio em uma rede são:

- Ruídos e interferências.
- Mudanças no comprimento do meio de transmissão.
- Mudanças na velocidade de propagação.
- Efeito Doppler devido ao movimento dos terminais móveis.
- Geração de relógios irregulares.

Por outro lado, quando existe a interligação entre equipamentos digitais que utilizam frequências autônomas, haverá sempre uma diferença entre os dois relógios, independente da precisão destes. Devido à diferença dos relógios, pode ocorrer à interrupção da seqüência de dados, pela perda ou duplicação de bits, efeito que é conhecido com *slips*. A ocorrência de *slips* não controlados geralmente causa a perda do sincronismo de quadro, de modo que os *slips* devem acontecer apenas pela repetição ou apagamento de um quadro inteiro. O efeito audível dos *slips* na voz digitalizada é um “click” ocasional. Em modems analógicos de alta velocidade, a ocorrência de *slips* causa erros de dados.

8 O ponto de divisão mais aceito entre wander e jitter é de 10 Hz.

Os motivos básicos para que os requisitos de temporização de uma rede digital sejam analisados com cuidado são: a rede deve evitar a ocorrência de *slips* não controlados; o plano de sincronização deve estabelecer uma taxa máxima de *slips* controlados.

Existem seis abordagens básicas de sincronizar uma rede digital:

- Plesiócrons.
- Bits de enchimento ao longo de toda a rede.
- Sincronização mútua.
- Sincronização através de relógio Mestre.
- Sincronização Mestre-Escravo.
- Rede Comutada a Pacotes.

2.11.1 Plesiócrons

Uma rede plesiócrons não possui sincronização, mas apenas utiliza relógios altamente precisos em todos os nós de comutação, de modo que a taxa de *slips* entre nós seja razoavelmente baixa. Este método é de implementação mais simples, pois não requer a distribuição do relógio pela rede, no entanto, implica que os pequenos nós de comutação também tenham as onerosas fontes de relógio altamente precisas.

O método plesiócrons é utilizado para sincronizar a rede de interconexão internacional. A recomendação G.811 do ITU-T estabelece como objetivo de estabilidade uma tolerância de 10^{-11} para os *gateways* internacionais, o que representa uma taxa de um *slip* controlado a cada 70 dias. Para se obter esta precisão é necessária a utilização de relógios atômicos de césio nos nós internacionais.

2.11.2 Bits de enchimento ao longo de toda a rede

Se todos os enlaces e nós comutadores da rede são projetados para uma taxa levemente superior a taxa nominal dos processos de digitalização, então todos os sinais de voz podem ser propagados através da rede sem que ocorram *slips*, colocando bits de enchimento para completar a taxa nominal do canal. Neste caso nenhum relógio precisa ser sincronizado com o outro, e podem ser utilizados relógios com certo grau de imprecisão.

2.11.3 Sincronização mútua

Na mútua sincronização, é obtida uma frequência de relógio comum através da troca de referências entre todos os nós da rede. Cada nó realiza a média das referências de entrada e utiliza este como relógio local e para transmissão. Após o período de inicialização, o relógio da rede normalmente converge para uma frequência estável. O principal ponto forte neste método é a não dependência de nós específicos, permanecendo operando mesmo com a falha do relógio de qualquer nó.

2.11.4 Sincronização Mestre

Um relógio mestre é transmitido para todos os nós da rede, fazendo com que todos os nós fiquem amarrados em uma frequência comum. Todos os nós precisam estar conectados diretamente ao mestre da rede, implicando em meios de transmissão disponíveis para a distribuição da referência.

2.11.5 Sincronização Mestre-Escravo.

É uma configuração que distribui a referência mestre da rede através dos próprios canais existentes. Inicialmente a referência é distribuída para um pequeno conjunto de nós da parte superior da hierarquia. Após estes nós sincronizarem seus relógios com a referência, removendo o *jitter*, a referência é passada para os nós inferior na hierarquia através dos enlaces digitais existentes. Cada nó recebe a referência de um nó de nível superior, e após se sincronizar repassa a referência para um outro nó.

Como todos os nós da rede estão sincronizados direta ou indiretamente com a mesma referência, eles têm a mesma taxa nominal, e por isso *slips* não devem ocorrer.

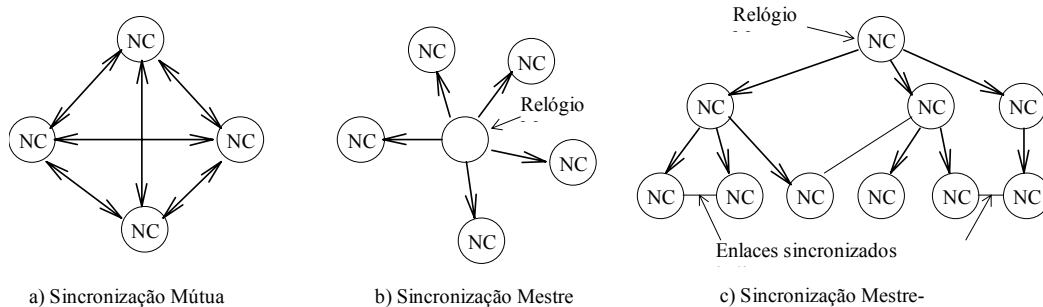


Figura 2.32 - Métodos de sincronização de rede.

2.11.6 Rede Comutada a Pacotes.

As redes comutadas a pacotes quebram as mensagens em blocos de dados identificados (pacotes). Entre os blocos os meios de transmissão da rede transmitem códigos nulos ou mensagens de controle. Neste caso, desde que os blocos sejam limitados, as diferenças de relógio podem ser absorvidas evitando a perda de dados.

2.12 Utilização dos meios para a transmissão digital.

Entre os meios de transmissão utilizados para a transmissão digital, temos os condutores de cobre que também são usadas na transmissão analógica, e as fibras óticas que são usadas exclusivamente para a transmissão digital.

Meio de Transmissão		Medidas (mm) ⁹	Frequência (MHz)
Conductor de cobre	Par Simétrico	0.4 a 1.2	< 2
	Mini Cabo Coaxial	0.7 / 2.9	0.2 ...20
	Pequeno Cabo Coaxial	1.2 / 4.4	0.06...70
	Cabo Coaxial Normal	2.6 / 9.5	0.06...300
Meio de Transmissão		Medidas (µm) ¹⁰	Comprimento de onda (nm)
Fibra óptica	Multimodo de Índice Gradual	50 / 125	820 ...900
			1270 ...1330
	Monomodo	10 / 125	1300 ou 1550

Figura 2.33 - Características dos meios de transmissão digital.

⁹ Nos cabos coaxiais as medidas se referem ao diâmetro externo do núcleo e diâmetro interno da casca condutora.

¹⁰ Nas fibras ótica as medidas se referem ao diâmetro externo do núcleo e diâmetro total da fibra de vidro.

Meio de Transmissão	2 Mbit/s	8 Mbit/s	34 Mbit/s	140 Mbit/s
Par simétrico	HDB3 1.73.5 km			
Mini cabo coaxial		HDB3 4 km	4B/3T 2 km	
Cabo coaxial pequeno			4B/3T 4 km	4B/3T ou CMI 2 km
Cabo coaxial normal			4B/3T 9.3 km	4B/3T ou CMI 4.65 km
Fibra multimodo de índice gradual	Binário ou CMI	Binário ou CMI	5B/6B	5B/6B
820...900 nm	8...12 km	9...11 km	5.5 km	5 km
1300 nm	20 km	15 km	12...21 km	7 km
Fibra multimodo de índice gradual	Binário ou CMI	5B/6B	5B/6B	5B/6B
820...900 nm	12...16 km	10...15 km	10...13 km	
1300 nm	30...40 km	25...35 km	29...39 km	20...30 km
Fibra monomodo			5B/6B	5B/6B
1300 nm			30...55 km	30...50 km
1550 nm				40...70 km

Figura 2.34 - Códigos de linha utilizados e distância entre regeneradores.

2.13 Componentes da rede SDH

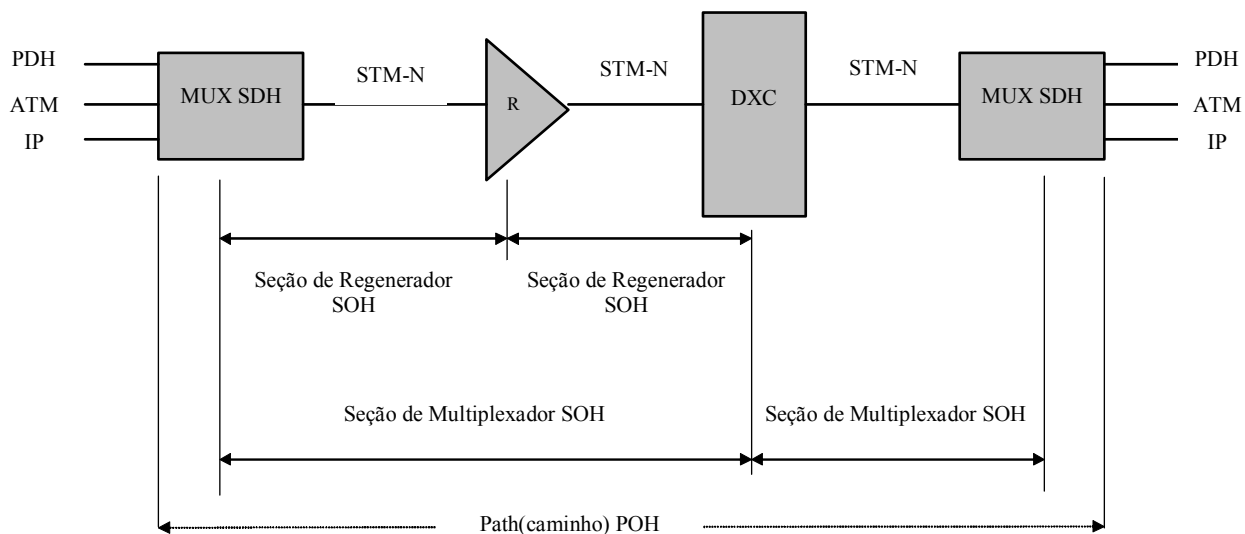


Figura 2.35 - Elementos de rede SDH e funções das seções do SOH.

2.13.1 Regenerador

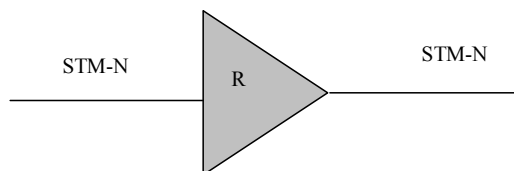


Figura 2.36 - Símbolo do Regenerador.

As principais funções do regenerador são:

- **Equalização** - restaurar o sinal na forma analógica para reduzir o máximo às interferências entre símbolos e ruído.
- **Amplificação Linear** - compensar a atenuação sofrida pelo sinal.
- **Recuperação do Relógio** - retirar a informação de relógio da linha de entrada para controlar e temporizar o funcionamento do regenerador.
- **Amostragem** - extrair as amostras do sinal de entrada.
- **Discriminação de níveis** - detectar o nível no quais as amostras se enquadram.

- **Reconstrução do sinal** - criar um sinal regenerado e transmiti-lo.

Além das operações acima os regeneradores tratam as informações contidas no RSOH, enviando e recebendo alarmes de faltas ocorridas na seção de regeneradores.

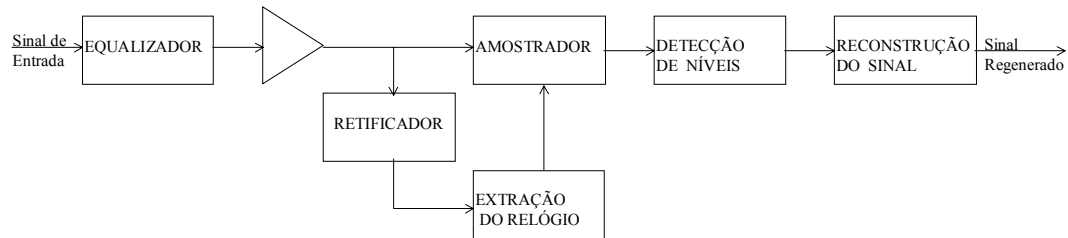


Figura 2.37 - Diagrama de Blocos do Regenerador.

O modo mais comum de sincronizar um relógio de receptor com o relógio do transmissor é utilizando um circuito PLL¹¹. O detector de fase mede a diferença de fase do relógio externo e do relógio gerado localmente através da diferença entre os pontos em que os dois sinais cruzam o zero. Quando o relógio externo cruza o zero antes do relógio interno, um pulso positivo é gerado e caso contrário um pulso negativo é gerado. A saída do detector de fase é filtrada para eliminar os ruídos, e então o valor da diferença de fase é utilizado para ajustar a frequência de um oscilador controlado por tensão (VCO).

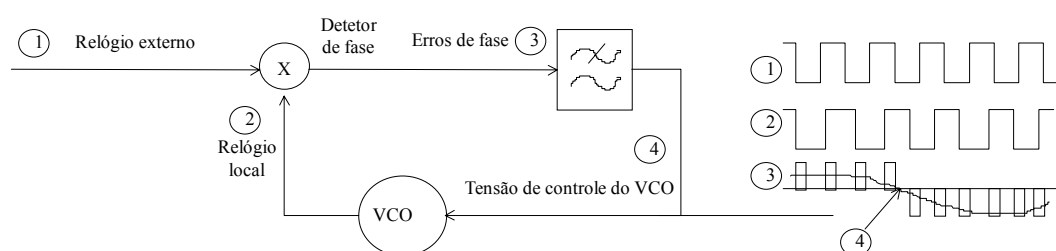


Figura 2.38 - Circuito de recuperação do relógio (PLL).

2.13.2 Equipamento PDH primário

É o equipamento que realiza a multiplexação e demultiplexação dos canais telefônicos. De um lado, possui as entradas e saídas dos 30 canais de

¹¹ PLL - Phase-locked loop

telefônicos, e do outro lado possui duas linhas multiplex de entrada e saída do sistema digital primário. As funções exercidas pelo equipamento são:

- Modulação e demodulação PCM.
- Multiplexação e demultiplexação TDM dos 30 canais.
- Composição do quadro do PCM30 na transmissão.
- Inserção e extração da sinalização de linha de cada canal.
- Alinhamento do quadro na recepção.
- Monitoração e alarmes.
- Geração do relógio para a transmissão de $2.048\text{kHz} \pm 50\text{ppm}$.
- Recuperação do relógio a partir do sinal PCM de entrada.
- Codificação de linha.

2.13.3 Terminais de linha (Multiplexadores)

Os multiplexadores combinam tributários PDH, SDH, ATM, RDSI, FRAME RELAY e outros, formando quadros de maiores taxas (STM-N). Realizam também a demultiplexação destes sinais.

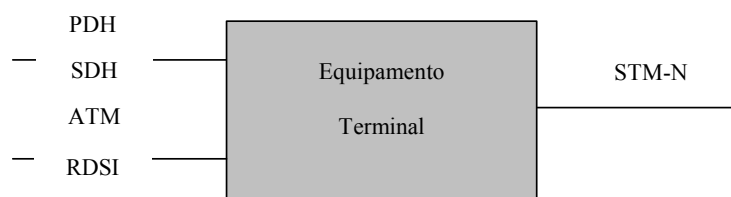


Figura 2.39 - Símbolo do equipamento terminal de linha.

2.13.4 Multiplexadores ADM (Add and Drop)

Os multiplexadores ADM além de multiplexar e demultiplexar, permitem também inserir (ADD) ou extrair (DROP) tributário de menor ordem de um enlace sem a necessidade de sucessivas etapas de demultiplexação, como no caso PDH. Estes equipamentos são usados nas redes em anel.

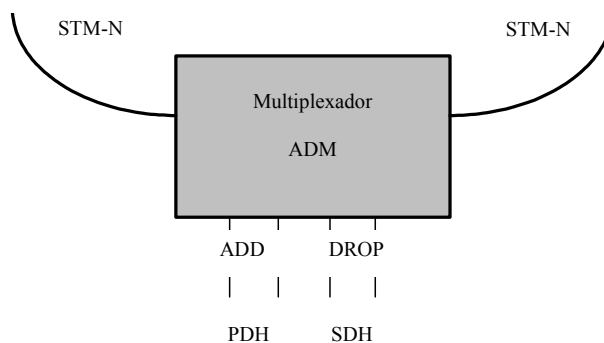


Figura 2.40 - Equipamento multiplexador ADM.

2.13.5 Digital Cross Connects(DXC)

Este elemento de rede executa todas as funções de um ADM e executa conexões cruzadas entre anéis (roteamento ou comutação), isto é permite escolher entre diferentes rotas de saída para onde enviar os tributários recebidos na entrada.

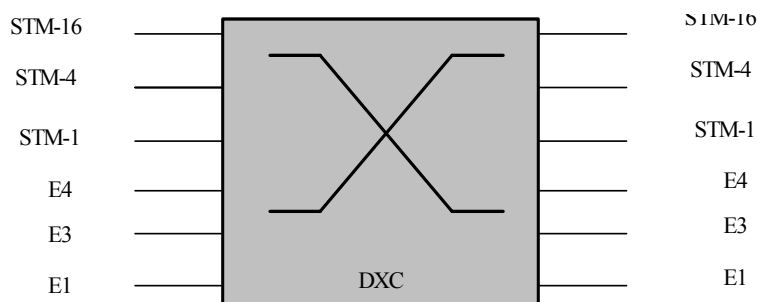


Figura 2.41 - Equipamento Cross-connect.

2.13.6 Anel SDH

A figura a seguir representa a estrutura típica de um anel SDH com vários tributários. A mistura de diferentes aplicações mostrada na figura é comum em dados transportados pelo SDH. A rede síncrona permite transmitir sinais plesiócronicos como também serviços como ATM.

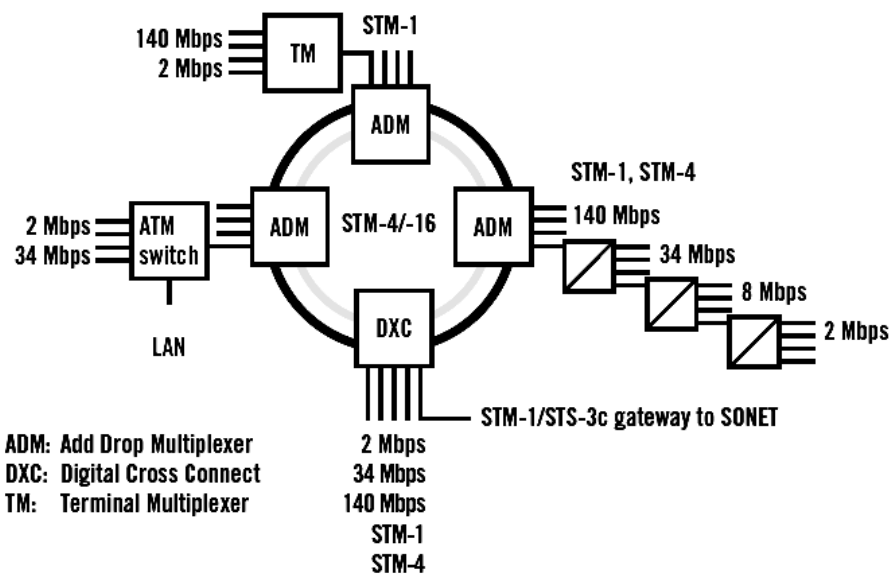


Figura 2.42 - Estrutura de um anel SDH.

2.14 Tecnologia WDM

Com o começo do emprego da fibra óptica como meio de transmissão de sistemas de telecomunicações, final da década de 70, diversas pesquisas começaram a buscar formas de utilizar toda a banda passante oferecida pelo novo meio para alcançar taxas de transmissões cada vez maiores.

Nos sistemas de transmissão telefônicos as tecnologias empregadas ou em desenvolvimento na época, PDH e SDH, baseadas em TDM, atingiam taxas de transmissão variáveis entre 2Mbit/s até 10 Gbit/s. Taxas que utilizam menos de 5% da capacidade de transmissão da fibra. Mesmo hoje, com a possibilidade de fabricação de equipamentos SDH com taxas de 40 Gbit/s ou acima disso, teríamos um baixo uso de utilização da capacidade da fibra.

No começo dos anos 80 surgiram diversas propostas de equipamentos WDM¹² (Multiplexação por Divisão de Comprimento de onda), os quais permitiam lançar numa mesma fibra dezenas de canais com altas taxas de transmissão. Como mostra a Figura 2.43, o espectro de transmissão óptico é

¹² WDM - Wave-length Division Multiplexing

dividido em diversos canais, mantendo entre eles uma banda de guarda, sendo todos os canais enviados pela mesma fibra.

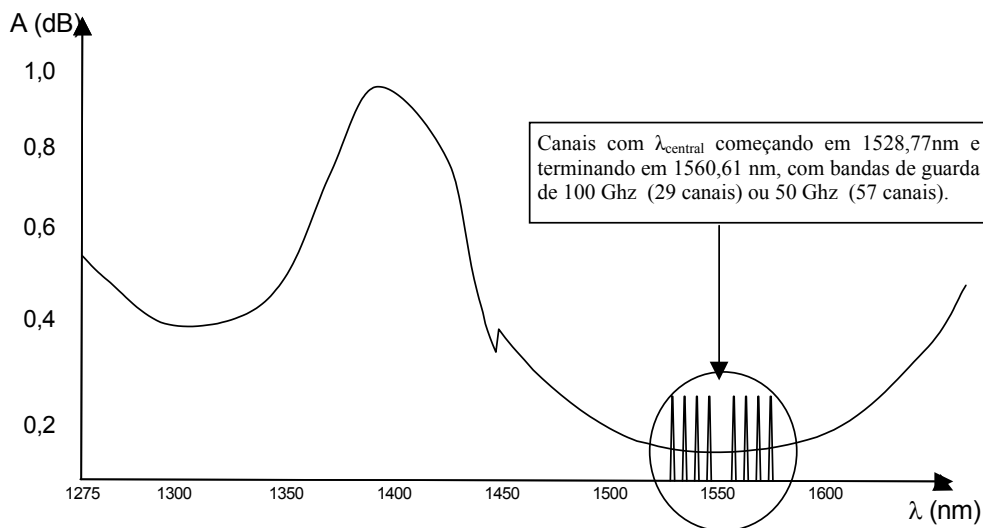


Figura 2.43 - Sistemas WDM, utilizando a janela de 1550nm, enviam diversos canais ópticos numa mesma fibra.

Inicialmente a tecnologia permitia apenas 4 ou 8 canais com grande separação entre eles. Mais tarde surgiram sistemas WDM com menor espaçamento entre canais, permitindo um maior número de canais multiplexados. Hoje em dia podemos dividir os sistemas WDM em três categorias, conforme o espaçamento entre os canais:

- CWDM (*coarse WDM*) espaçamento de 200 GHz entre canais, com 4 a 16 canais
- DWDM (*dense WDM*) espaçamentos de 100 , 50 ou 25 GHz, com 16 a 128 canais
- UDWDM (*ultra dense WDM*) espaçamentos inferiores a 25 GHz e com número de canais superior a 128.

A tecnologia WDM permite o uso mais racional da capacidade de transmissão das fibras ópticas, diminuindo o custo da transmissão. As concessionárias utilizam as fibras já instaladas acoplando os equipamentos necessários para implementação do WDM, com isso eliminam o custo e o tempo necessário para instalar novas fibras.

No sistema telefônico a tecnologia WDM é utilizada para multiplexar sinais acima de 622 Mbit/s, tais como o STM-16 (2,5 Gbit/s) e o STM-64 (10Gbit/s). Em termos de espectro os sistemas WDM utilizam as bandas C e L (ver Figura 2.44 e Figura 2.45), próxima ao comprimento de onda de 1550 nm. Em alguns casos podem-se utilizar todas as bandas entre as janelas de 1310nm e 1550nm¹³.

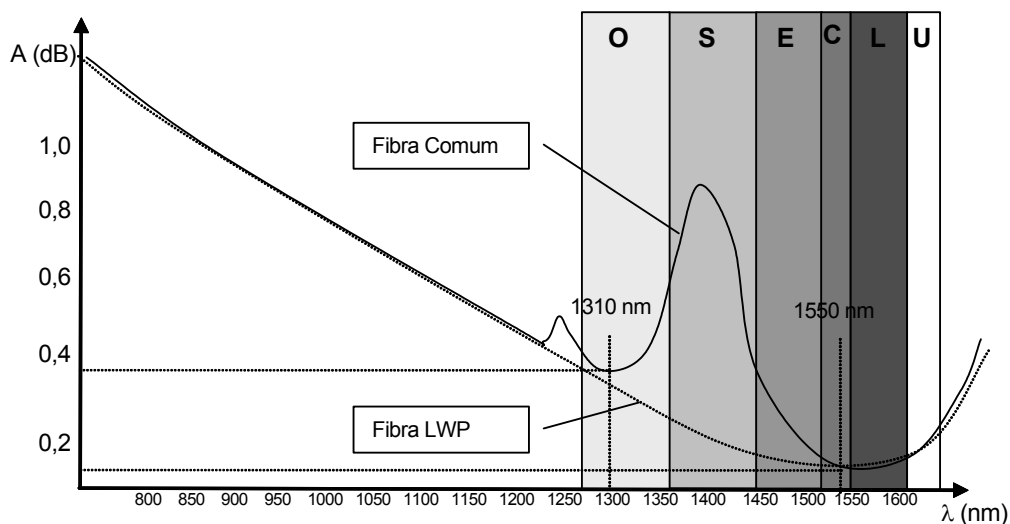


Figura 2.44 - Classificação das bandas do espectro óptico entre 1310nm e 1550nm.

Banda	Significado	Espectro óptico	Largura de banda
O	Original	1.260 a 1.360 nm	100 nm
S	Short	1.360 a 1.460 nm	100 nm
E	Expanded	1.460 a 1.530 nm	70 nm
C	Conventional	1.530 a 1.565 nm	35 nm
L	Long	1.565 a 1.625 nm	60 nm
U	Ultra long	1.625 a 1675 nm	50 nm

Figura 2.45 - Denominação, λ e largura de banda das faixas do espectro óptico nas janelas de 1310 e 1550 nm

¹³ O desenvolvimento de fibras com baixa atenuação devido aos íons de hidroxila ($^{\ast}\text{OH}$), fibras SM-LWP (monomodo com baixo pico d'água), estão favorecendo pesquisas para melhor aproveitamento do espectro óptico.

2.15 Componentes de redes WDM

As redes WDM são compostas basicamente por cinco equipamentos: Transponder, Multiplexadores, Amplificadores Ópticos, OADM e ODXC. Abaixo descreveremos sucintamente cada um deles.

a) Transponder

É o equipamento destinado a interligar os equipamentos SDH aos multiplexadores ópticos. Em geral os equipamentos SDH possuem saídas ópticas com $\lambda = 1550$ nm, o transponder converte uma entrada laser de espectro largo em um sinal de espectro estreito e vice-versa. Para cada comprimento de onda é necessário um transponder. No lado de entrada o sinal pode ser de 850/1310/1550nm, enquanto que no lado DWDM o comprimento é de 15xx nm de acordo com os canais especificados pelo padrão G.692 do ITU-T. Além da conversão de comprimentos de onda o transponder também equaliza (reformata, retemporiza e regenera) o sinal.

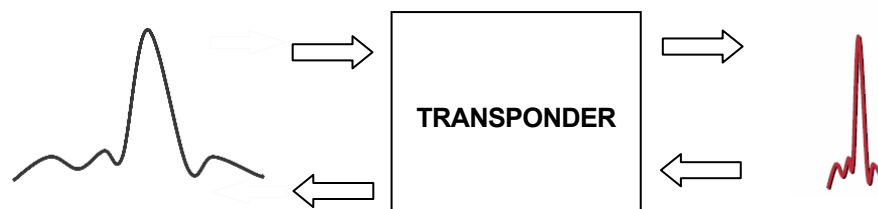


Figura 2.46 - Transponder Óptico.

b) Multiplexador/Demultiplexador

O equipamento multiplexador é um componente passivo, não fornece potência para o sinal. Geralmente utilizam tecnologia de acopladores baseados em fusão de fibra para multiplexar e de grades de Bragg para demultiplexar.

Os dispositivos multiplexadores são formados por cadeias de acopladores 2:1 obtidos da fusão controlada dos núcleos de duas fibras monomodo. Como comentado anteriormente atualmente existem equipamentos que multiplexam 128 λ ou mais.

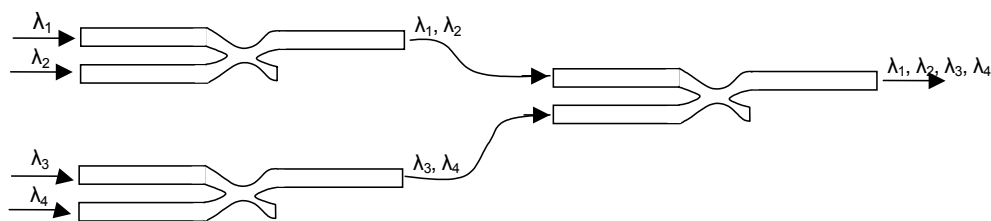


Figura 2.47 - Princípio de funcionamento do acoplador óptico.

Os demultiplexadores consistem em grades de Bragg vinculadas com circuladores ópticos. As grades de Bragg são pedaços de fibra óptica monomodo com variações do índice de refração ao longo do eixo. Conforme a mudança do índice de refração o λ é refletido, retornando seu caminho, enquanto os outros seguem sem alterações. O λ que retorna é encaminhado para uma saída conectada a um receptor óptico

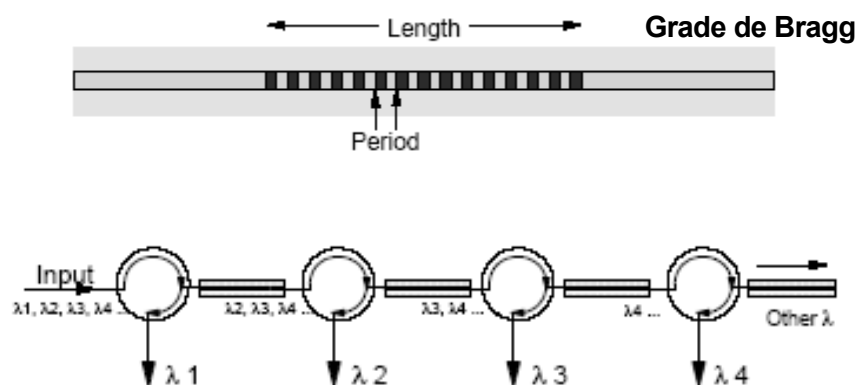


Figura 2.48 - Grade de Bragg e um circuito com circuladores e a grade de Bragg selecionando comprimentos de onda para demultiplexação.

c) Pré-amplificadores e Amplificadores Ópticos de Linha

Eles são amplificadores construídos com fibras dopadas com érbio. Muitas vezes o valor de saída desses amplificadores é fixo (ex. 20 dBm), sendo o ganho obtido da diferença entre o valor de entrada e o valor de saída do amplificador. Em alguns casos os amplificadores permitem ajuste automático da potência do sinal, o equipamento receptor monitora o valor do sinal de recepção e envia para o amplificador da transmissão qualquer mudança ocorrida, o amplificador da transmissão estabelece novo ganho para compensar a alteração do sinal de saída.

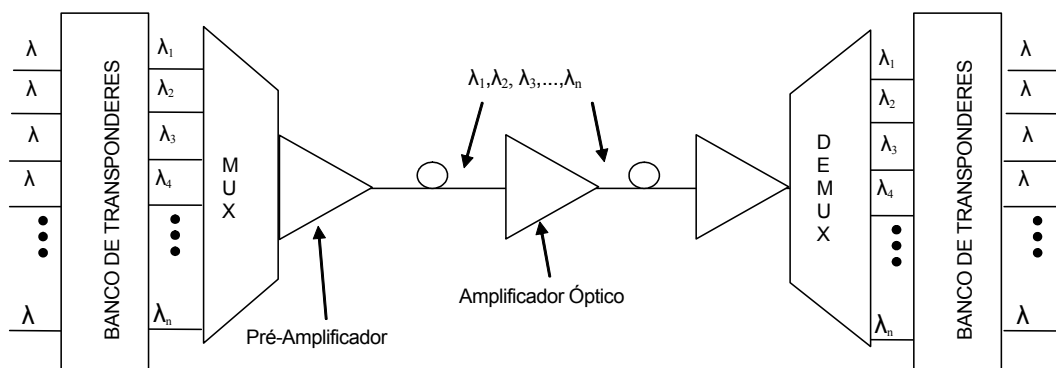


Figura 2.49 - Enlace ponto a ponto de WDM.

d) OADM (Multiplexador Add Drop Óptico)

O OADM é o equivalente ao ADM, porém os tributários do OADM são os comprimentos de ondas multiplexados na fibra. O OADM pode inserir ou retirar um comprimento de onda de um fluxo com diversos comprimentos de onda multiplexados

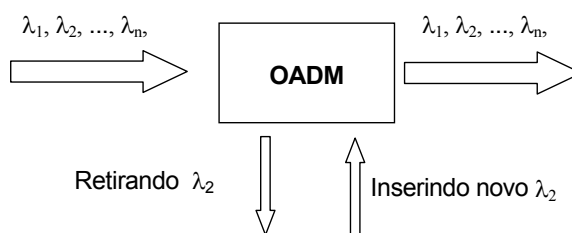


Figura 2.50 - Diagrama do OADM.

e) ODXC (Comutador Digital Óptico)

O ODXC permite comutar entre anéis fluxos de comprimentos de ondas multiplexados.

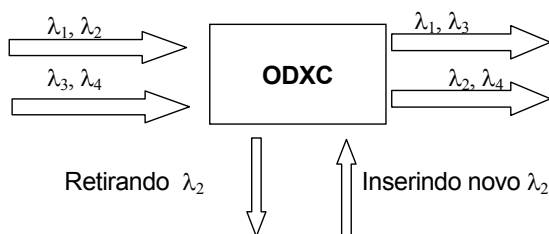


Figura 2.51 - Diagrama do ODXC.

2.16 Referências bibliográficas

- [1] ALENCAR, M.S.: *Telefonia Digital*, Érica, 1998.
- [2] FERRARI, A.M.: *Telecomunicações: evolução e revolução*, Erica, 1991.
- [3] BELLAMY, J.: *Digital Telephony*. 2 ed., Willey, New York, 1991.
- [4] FONTOLLIET: *Telecommunication Systems*. Artech House - 1986.
- [5] KEISER, B.E. & STRNGE, E.: *Digital Telephony and Network Integration*, Van Nostrand Reinold, New York, 1985.
- [6] LATHI,B.P.: *Sistemas de Comunicações*. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1968.
- [7] OWEN, F.F.E.: *PCM and Digital Transmission Systems*. McGraw-Hill, New York, 1982.
- [8] SKLAR, B.: *Digital Communications - Fundamentals and Applications*. Prentice-Hall, New Jersey, 1988.
- [9] SCHULTZ, E: *Synchronous Digital Hierarchy Pocket Guide*, Actenar Eningen GmbH, Germany.
- [10] DUTTON, H.J.R.: *Understanting Optical Communications*. Redebooks IBM, USA, 1998
- [11] ERRIQUEZ P. & Freitas, C. E. A.: *Redes WDM*, Tutorial, www.teleco.com.br, 2004.
- [12] FERNANDES, L. F. C.: *DWDM*. Tutorial, www.teleco.com.br, 2003.
- [13] SCHULTZ, E: *Synchronous Digital Hierarchy Pocket Guide*, Actenar Eningen GmbH, Germany.