

Capítulo 6

Multiplexagem

Quando o canal de transmissão possui uma capacidade muito superior ao débito da fonte, ou seja, quando $B_T \gg B$ ou $B_T \gg r_s/2$, pode utilizar-se esse canal para transportar os sinais de mais do que uma fonte. Quando assim se procede diz-se que o canal está a ser partilhado ou *multiplexado*.

Essencialmente, um canal pode ser partilhado no *tempo* ou na *frequência*.

No primeiro caso, designado por TDM ou Multiplexagem por Divisão do Tempo (Time Division Multiplexing), cada fonte ocupa toda a largura de banda disponível do sistema durante parte do tempo. No segundo caso, designado por FDM ou Multiplexagem por Divisão da Frequência (Frequency Division Multiplexing), cada fonte ocupa uma fracção da largura de banda disponível do sistema durante todo o tempo.

FDM é o método mais antigo e mais conhecido visto que se lida com ele diariamente quando, por exemplo, se sintoniza uma estação de rádio ou de televisão. O espaço livre constitui o meio comum de transmissão que é multiplexado em frequência pelas várias estações de radiodifusão.

O FDM é o mais apropriado quando a transmissão é analógica. Actualmente, com a progressiva digitalização das comunicações tem perdido importância a favor do TDM que constitui a base dos modernos sistemas de telecomunicações e certamente da maioria dos futuros.

Existem também as formas de multiplexagem por divisão de espaço, SDM (Space Division Multiplexing), e por divisão de código, CDMA (Code Division Multiple Access), mais apropriados a outros contextos que não o da transmissão e que se abordarão na altura própria. Começaremos

por estudar o TDM e faremos apenas, na parte final deste capítulo, uma referência ao FDM.

6.1 Multiplexagem por divisão do tempo, TDM

Um sinal amostrado é nulo nos intervalos de tempo entre as amostras, ou seja, durante grande parte do tempo. Se se pretender transmitir o sinal sob esta forma (PAM) esses intervalos podem ser utilizados, em particular, para transmitir as amostras de sinais de outras fontes, intercalando-as entre si.

A figura 6.1 a) representa as características essenciais de um sistema TDM onde várias fontes de sinal distintas partilham um único canal de transmissão. Cada um dos sinais é previamente filtrado a fim de limitar a banda espectral. Um *comutador rotativo* de amostragem do lado do transmissor extrai uma amostra de cada entrada por cada rotação. A saída deste comutador, fig 6.1 b), é um sinal PAM contendo as amostras de cada fonte periodicamente intercaladas no tempo.

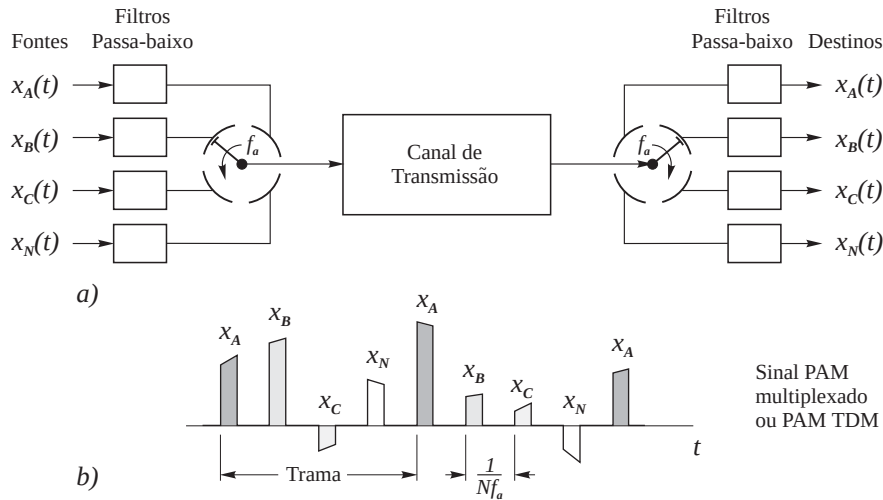


Figura 6.1: Multiplexagem por divisão do tempo. Sistema TDM

Do lado do receptor existe um comutador rotativo semelhante, ou *distribuidor*, que separa as amostras e as distribui por filtros passa-baixo,

um por cada saída, que reconstituem os sinais analógicos originais. Convém lembrar que, embora ambos os conjuntos de filtros possuam características passa-baixo, eles destinam-se a fins completamente diferentes. O primeiro conjunto de filtros *limita* a banda dos sinais para evitar o *aliasing* e o segundo conjunto *reconstrói* os sinais a partir das suas amostras.

Se todas as fontes produzirem sinais com a mesma largura de banda B , o comutador deverá rodar ao ritmo $f_a \geq 2B$ ciclos/s por forma a que amostras sucessivas de cada entrada estejam espaçadas no tempo de $T_a = 1/f_a$ segundos. A um conjunto, ordenado no tempo, constituído por uma amostra de cada entrada chama-se uma *trama*. A figura 6.1 b) mostra duas tramas TDM que transitam no canal de transmissão TDM. Se houver N pares de fonte/destino o espaçamento temporal entre amostras consecutivas numa *trama* será então de $T_a/N = 1/Nf_a$. Assim, o ritmo de pulsos PAM no canal de transmissão será de

$$r_c = Nf_a \geq 2NB \quad (6.1)$$

que é o *ritmo de transmissão* do *sinal TDM*.

Na prática, tal como se referiu no capítulo anterior, a comutação é feita electronicamente. A figura 6.2 a) mostra uma realização de um comutador electrónico para TDM em que as *gates* dos transistores que constituem as portas de modulação de pulso são controladas por um registo de deslocamento realimentado¹ constituído por flip-flops tipo-D que mantêm um único 1 lógico a *circular* ao ritmo de um relógio de frequência Nf_a Hz. A circulação daquele dígito provoca o *fecho* sequencial das portas (comutadores) emulando assim o comutador mecânico rotativo. As saídas dos comutadores são adicionadas num somador analógico que produz finalmente o sinal TDM para transmissão. Na figura 6.2 b) estão representados os diagramas de temporização do registo de deslocamento, das *gates* dos comutadores e do circuito de *manutenção (hold)*.

6.1.1 Sincronização

Uma questão essencial nestes sistemas de multiplexagem é a da *sincronização* entre o comutador e o distribuidor. Trata-se de uma questão crítica pelo facto de cada amostra ter de ser entregue ao destino correcto no instante devido. Isto significa que o distribuidor deve estar posicionado na

¹pode verificar-se que se trata de um *ring counter* auto-corrector

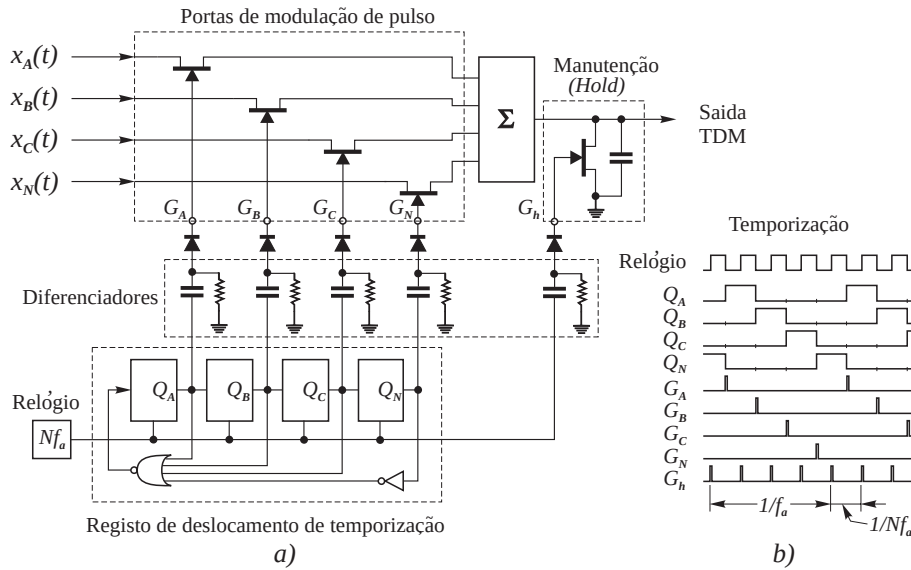


Figura 6.2: Realização de um comutador electrónico para TDM

saída do destino i sempre que chega uma amostra originária da fonte i . Quando isto acontece diz-se que a trama está *alinhada*.

Uma técnica de sincronização simples e elementar é aquela que dedica uma *célula* temporal por *trama* à transmissão de um pulso-marca que é caracterizado por possuir uma amplitude superior ao valor máximo da amplitude que alguma vez possa ocorrer numa amostra qualquer, como mostra a figura 6.3. A *marca* é o último pulso transmitido em cada trama.

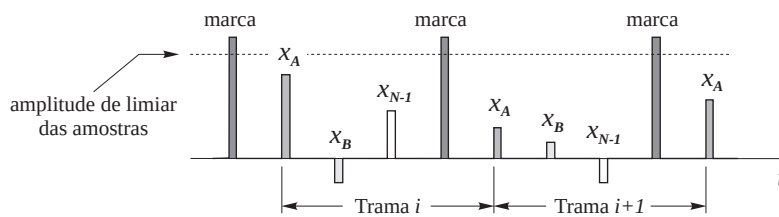


Figura 6.3: Sinal PAM TDM com marcas para sincronização

Assim, um circuito electrónico detector de limiar (ou de nível) colocado no

receptor², antes do distribuidor, ao detectar a *marca* provoca um *reset* no circuito lógico de controlo do distribuidor de modo a que este se posicione inicialmente na primeira saída. Estas *marcas* definem a frequência de trama f_a no receptor mas o número de pares de fonte/destino de sinal é reduzida a $N - 1$. Existem, naturalmente, outras técnicas de sincronização mais sofisticadas que se abordarão mais adiante.

6.1.2 Conceito de canal virtual

Do ponto de vista de cada par individual fonte/destino tudo se passa como se existisse entre eles um *caminho dedicado* pelo qual transitam as amostras do respectivo sinal. Considerando que podem existir $N > 1$ pares fonte/destino, o sistema de transmissão está a fornecer N caminhos distintos sobre um único canal *físico*, neste caso, o canal TDM. Cada um destes caminhos distintos é um canal de comunicação fim-a-fim ou *canal virtual* fonte-destino. Através deste conceito tudo se passa pois como se cada fonte estivesse ligada ao destino correspondente através de um circuito físico dedicado distinto.

O conceito de canal virtual (ou canal lógico) aparece frequentemente em outros contextos das telecomunicações, em especial na comunicação de dados e nos protocolos de comunicação entre computadores. Embora esses contextos sejam diferentes, como se verá, o conceito é essencialmente o mesmo.

A figura 6.4 ilustra o conceito de canal virtual ao representar o sistema TDM da figura 6.1 a) do ponto de vista da comunicação fim-a-fim entre cada fonte e o correspondente destino.

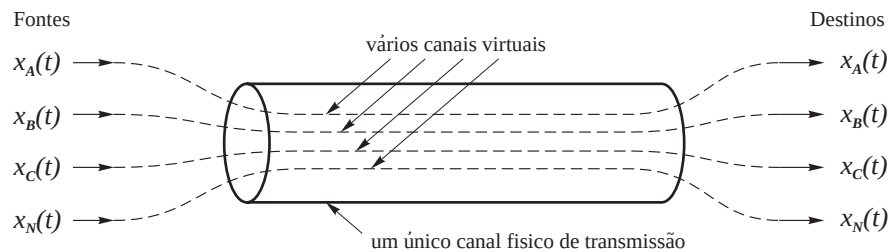


Figura 6.4: Representação do conceito de canal virtual

²ter-se-ia de conceber a lógica para lidar com estas *marcas*

6.1.3 Técnicas TDM

Na técnica que se acabou de descrever, os símbolos sucedem-se regularmente no tempo. As tramas são também contíguas no tempo, ou seja, ocorrem sem interrupção.

Se uma determinada fonte deixar de transmitir, os intervalos de tempo que lhe estão atribuídos em cada trama têm de decorrer embora não estejam a ser utilizados pois é a ordenação temporal desses intervalos que identifica o canal a que cada um pertence. Quando assim é, a técnica designa-se por *TDM síncrono*.

Quando se organiza a multiplexagem de modo a que não se exige nem a referida ordenação temporal nem a contiguidade das tramas, pode-se aproveitar o tempo que de outro modo seria desperdiçado quando determinado canal não produz *tráfego*, e está-se perante um *TDM assíncrono*, técnica também designada por *multiplexagem estatística* ou *Modo de Transferência Assíncrono* (ATM³).

6.2 TDM síncrono

A primeira forma de TDM síncrono apareceu com a digitalização PCM do sistema de telecomunicações eléctrico mais antigo — o sistema telefónico. A *normalização* da estrutura do TDM síncrono começou pois por estar fortemente influenciada pela preocupação de transmitir canais de voz de qualidade telefónica, donde resultou o designado sistema de multiplexagem PCM. A sua estrutura, porém, mostrou-se menos adequada a outros serviços de telecomunicações que foram surgindo posteriormente, como sejam, a televisão digitalizada, a comunicação de dados de alta velocidade entre computadores, etc, que se destinam a transmitir fontes de informação com características muito diferentes das da voz. Surgiram assim outras estruturas de multiplexagem, como sejam o SDH e o SONET. Estudaremos os fundamentos do TDM síncrono tomando como referência o sistema PCM e abordaremos depois alguns aspectos doutros sistemas.

³o termo ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) tem sido reservado para o contexto da comutação

6.2.1 Organização das tramas

Os sistemas TDM digitais multiplexam os canais sob a forma digital binária. Se as fontes são originalmente analógicas então estas são previamente convertidas a digital. A cada amostra PAM, depois de quantizada e codificada em binário, passa assim a corresponder um grupo de k bits que é designado por *palavra*. O ritmo *unitário* adoptado, designado por *ritmo básico*, é o resultante da digitalização de um canal telefónico ($B = 4$ KHz) quantizado a 8 bits por amostra, isto é, a unidade de velocidade digital é de

$$r_{\text{básico}} = 2 \times B \times k = 2 \times 4 \times 8 = 64 \quad \text{Kbps}$$

Uma *trama*, que passa a ser constituída pela multiplexagem no tempo de N canais de k bits, tem uma estrutura repetitiva que pode ser organizada de duas maneiras diferentes tal como mostra a figura 6.5:

- ou por *canais entrelaçados*, em que a trama é sub-dividida em N ou mais *células temporais* cada uma das quais contendo um grupo de k dígitos todos pertencentes ao mesmo canal digital;
- ou por *dígitos entrelaçados*, em que a trama é sub-dividida em k células temporais cada uma contendo os N ou mais dígitos da mesma ordem de cada um dos canais.

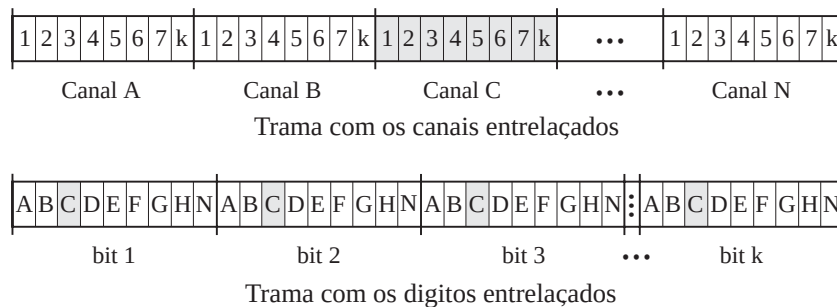


Figura 6.5: Formas de organização de tramas

A multiplexagem primária PCM é feita por canais entrelaçados e a multiplexagem de ordem superior é feita por dígitos entrelaçados.

6.2.2 Alinhamento das tramas

A operação de *alinhamento* de trama, típica da multiplexagem síncrona, consiste na sincronização do equipamento terminal de recepção (distribuidor), tanto em frequência como em fase, à sequência de símbolos que está a receber, isto é, na detecção do início da trama. É evidente que esta operação é necessária, pelo menos, cada vez que o receptor entra em operação (ao ser inicialmente ligado ou após uma interrupção, qualquer que seja a natureza desta). Uma vez *alinhado*, o receptor necessita, mesmo assim, de uma referência temporal periódica de modo a verificar o seu *isocronismo* e detectar eventuais desvios de fase. A referência temporal necessária consiste num determinado *padrão* de vários bits transportados periodicamente pela trama de acordo com uma das seguintes organizações:

- padrão de alinhamento *agrupado*: constituído por ν bits consecutivos no início de cada trama;
- padrão de alinhamento *distribuído*: os ν bits do padrão estão espalhados por determinadas posições dentro de uma trama ou ao longo de várias tramas.

Quando o receptor perde o alinhamento de trama, passa a procurar por este padrão de modo a se realinhar no mais curto intervalo de tempo possível (poucas tramas). Diz-se que o receptor está em *modo caça*⁴. Existe porém o *perigo de simulação* do padrão de alinhamento devido à ocorrência fortuita de uma combinação dos bits de informação igual à do padrão. Pode proteger-se o sistema de multiplexagem desta situação de várias maneiras, nomeadamente:

- escolhendo-se um padrão de alinhamento com baixa autocorrelação, impossível de reproduzir por deslocação e associação com dígitos vizinhos aleatórios, como por exemplo

$$\begin{aligned} \nu = 3: & \quad 110 \\ \nu = 7: & \quad 0011011 \end{aligned}$$
- bloqueando-se todos os canais da trama, isto é, substituindo-os pela emissão de sequências determinísticas, quando o alinhamento é perdido na recepção.

⁴*hunt mode*

- confirmando o correcto alinhamento através de um critério diferente, por exemplo, pela ausência do padrão de alinhamento em tramas alternadas.

Contudo, quando existe alinhamento, a reacção do desmultiplexador a uma recepção incorrecta do padrão de alinhamento deve ser retardada (histerese) por forma a evitar reacções àquilo que pode apenas ser um erro de transmissão em que o alinhamento não foi efectivamente perdido.

6.2.3 Sinalização

Designa-se por *sinalização* a transmissão de informação auxiliar entre os equipamentos de multiplexagem de modo a estes se poderem controlar entre si. Por exemplo, pode desejar-se que o sinal da entrada número 3 seja entregue à saída número 7, situação típica de uma função de *comutação*.

A informação de sinalização trocada entre os equipamentos deverá, portanto, possuir uma semântica própria, o que não acontece com a informação transportada entre as fontes e destinos ligados aos equipamentos a qual é transferida de forma *transparente* (não interpretada), e é digital por natureza constituindo comandos, confirmações, etc.

Podem conceber-se várias soluções para a transferência de informação de sinalização:

- *sinalização dentro-do-octeto*⁵, também chamada por *roubo de bit*⁶, pela qual o bit (dígito) menos significativo do octeto da amostra codificada é periodicamente utilizado para a sinalização (por exemplo, de 6 em 6 tramas). O resultado é uma degradação imperceptível da correspondente transmissão quando esta é analógica mas uma grave restrição à utilização desse canal digital para transmissão de dados.
- *sinalização fora-do-octeto*, pela qual, a cada canal de k dígitos de informação são associados, num canal separado, um ou mais dígitos de sinalização. Os dígitos do canal de sinalização respeitante a cada um dos N canais de informação poderão estar *distribuídos* ao longo da trama, isto é, seguirem-se imediatamente aos dígitos de informação do canal correspondente, ou estar *agrupados* numa ranhura

⁵também designada sinalização dentro da banda ou *in-band signaling*

⁶*bit stealing*

temporal única especificamente reservada para esse efeito, a qual é ciclicamente atribuída a cada um dos N canais de informação da trama.

Em qualquer dos casos a atribuição dos dígitos de sinalização é feita de uma forma fixa, segundo uma regra pré-estabelecida.

No primeiro caso o ritmo de sinalização é de pelo menos 8 Kbps por canal e, no segundo caso, de até $64/N$ Kbps por canal.

- *sinalização em canal comum*, pela qual é reservado um canal por trama para sinalização, o qual é atribuído *ocasionalmente* e *de acordo com as necessidades*, a um ou a outro canal. A sinalização é então efectuada através de *mensagens etiquetadas*, isto é, numa determinada trama o valor dos k dígitos do canal de sinalização constituem a *etiqueta*, que identifica o canal a que a sinalização (*mensagem*) das tramas subsequentes se refere.

O que deve estar pré-estabelecido é apenas em que tramas é que o valor do canal de sinalização deve ser interpretado como *etiqueta*.

O ritmo de sinalização instantâneo disponível, neste caso para um canal de cada vez, é de 64 Kbps.

A *sinalização em canal comum* é a técnica mais utilizada actualmente, que serve não apenas para a sinalização dos canais mas também para a troca de informação auxiliar, ou de control, entre os próprios multiplexadores.

6.2.4 Sistemas de multiplexagem PCM

Sistemas Europeu e Americano

Sob pena de proliferarem sistemas de multiplexagem incompatíveis, os diversos parâmetros destes sistemas — ritmos de transmissão, número de canais por trama, método de sinalização, etc — foram sujeitos a normalização que se iniciou mais cedo nos Estados Unidos da America e no Japão do que na Europa não se tendo aqui optado exactamente pelas normas Americanas por entretanto a experiência ter mostrado possuírem algumas deficiências ou já não se adaptarem tão bem à tecnologia mais recente. Aparecem assim os chamados sistema Americano (ou sistema AT&T) e o sistema Europeu ambos especificados em Recomendações da ITU⁷.

⁷International Telecommunications Union

Estrutura da trama PCM primária de 2 Mbps

O sistema de multiplexagem primário Europeu é caracterizado por um ritmo total de 2 048 Kbps, abreviadamente referido por ritmo de 2 Mbps, resultante da composição da trama de 125 μ s de duração por 32 canais básicos. A figura 6.6 representa a estrutura desta trama. Os canais 1 a 15 e 17 a 31 constituem os 30 canais de informação utilizáveis quer para transmissão telefónica PCM quer para transmissão digital directa (transmissão de dados, telefax, etc) e sob o ponto de vista do utilizador estão numerados de 1 a 30, razão pela qual este sistema primário se designa por MIC30⁸.

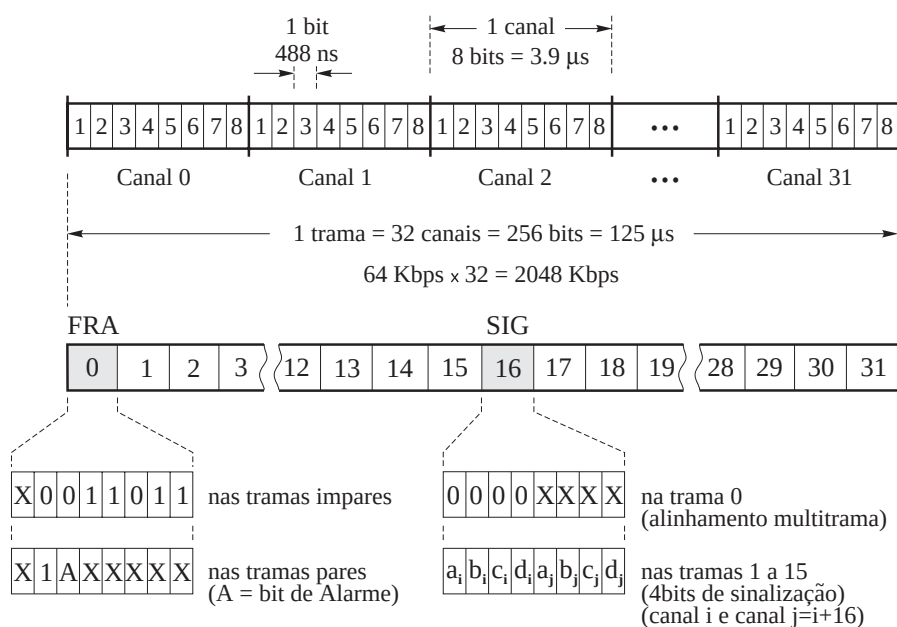


Figura 6.6: Estrutura da trama de multiplexagem PCM de 2 Mbps

O canal 0 destina-se à transmissão, em tramas alternadas, do padrão de alinhamento de trama, FRA⁹. Nas restantes tramas este canal transporta um bit de alarme A que anuncia a perda de alinhamento de trama na direcção oposta.

⁸Modulação de Impulso Codificada com 30 canais

⁹FFrame Alignment

A sinalização é do tipo *fora-do-octeto*, canal a canal, estando atribuídos 4 dígitos por canal, agrupados nas duas metades do canal 16 designado canal SIG¹⁰. São pois necessárias 15 tramas para transportar a sinalização dos 30 canais úteis, as quais, juntamante com uma 16^a trama (a trama número 0), constituem uma *multitrama* como se mostra na figura 6.7. O canal 16 da trama número 0 contém um padrão de *alinhamento de multitrama* que permite numerar, sem ambiguidade, as tramas que constituem uma multitrama. Cada canal dispõe portanto de 4 bits de sinalização em cada 16 tramas, isto é, a intervalos de 2 ms, o que dá um ritmo de sinalização médio por canal de 2 Kbps.

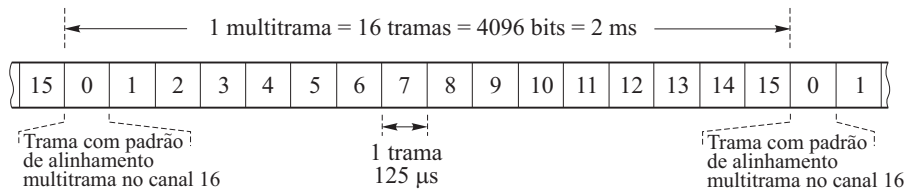


Figura 6.7: Multitrama PCM de 2 Mbps

Alinhamento e interpretação da trama

A figura 6.8 representa o algoritmo completo do procedimento de sincronização, verificação de alinhamento e re-alinhamento, tal como se encontra especificado na Recomendação G.732 da ITU. São de salientar os seguintes pontos:

- a histerese do processo de monitorização: só se considera ter ocorrido perda de alinhamento após três ausências consecutivas do padrão de alinhamento, FRA;
- a confirmação de alinhamento pela presença de um valor diferente do bit da segunda posição (B_2) do canal 0 da trama seguinte àquela em que o padrão FRA foi reconhecido;
- o anúncio da perda de alinhamento através do bit de alarme A , emitido na direcção oposta.

Dependendo da situação, o realinhamento demora entre $250 \mu s$ e $375 \mu s$.

¹⁰SIGnaling channel

Estrutura da trama PCM primária de 1.5 Mbps

No sistema Americano de multiplexagem primária, a trama tem a mesma duração de $125 \mu\text{s}$ mas é composta por apenas 24 canais básicos também com 8 bits por canal. O alinhamento de trama neste sistema consiste na utilização de um único bit inicial de sincronismo por trama. Assim, uma trama é constituída por $24 \times 8 + 1 = 193$ bits sendo o ritmo primário então de $193 \text{ bits} / 125 \mu\text{s} = 1544 \text{ Kbps}$, abreviadamente designado de 1.5 Mbps. A figura 6.9 representa a estrutura da trama do sistema primário Americano. As tramas são consideradas alinhadas quando na

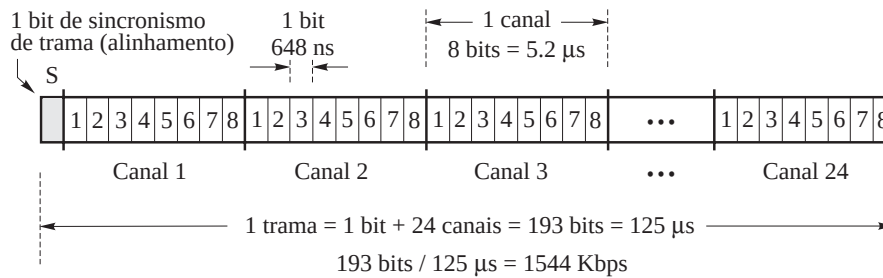


Figura 6.9: Estrutura da trama de multiplexagem PCM de 1.5 Mbps

sequência de valores do bit de sincronismo se observar o seguinte padrão cíclico: 100011011100. Isto significa que o sincronismo é efectuado com base numa multitrama de 12 tramas. Numa multitrama, as tramas são identificadas de 1 a 12 de acordo com o valor, ordenado, do respectivo bit de sincronismo.

Para a sinalização é roubado o último dígito (o menos significativo) de cada canal nas tramas 6 e 12 deixando livres, nestas tramas, apenas sete bits por canal para a informação útil.

Trata-se, portanto, de um sistema de sinalização *dentro-do-octeto* sendo roubados 1 bit por canal de 6 em 6 tramas. Conclui-se então, conforme se referiu na secção 6.2.3 a propósito deste tipo de sinalização, que as tramas 6 e 12 não podem ser utilizadas para transmissão de dados sob pena de se introduzir uma elevadíssima taxa de erros. Assim, sempre que um canal esteja a ser utilizado para comunicação de dados, o símbolo (grupo de 8 bits) seguinte ao que vai nesse canal da trama 5, segue na trama 7 seguinte; e o seguinte ao que vai nesse canal da trama 11 segue na trama 1 seguinte.

Um exemplo de utilização da sinalização é precisamente o tratamento deste caso, em que o multiplexador tem de fazer saber ao distribuidor que determinado canal vai ser usado para comunicação de dados de modo a que o sistema se comporte da maneira descrita.

Neste sistema a sinalização está organizada em dois canais de sinalização: o *canal A*, constituído pelos bits de sinalização transportados nas tramas 6, e o *canal B*, constituído pelos bits de sinalização transportados nas tramas 12. A figura 6.10 ilustra a localização destes canais na multitrama.

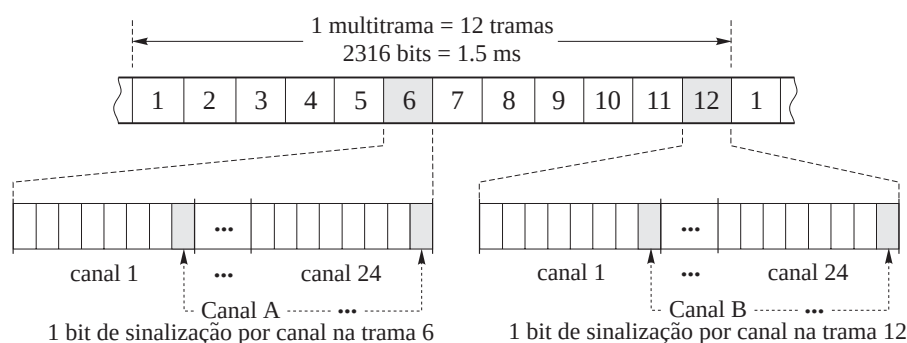


Figura 6.10: Multitrama PCM de 1.5 Mbps e canais de sinalização

6.2.5 Hierarquia de multiplexagem PDH

Multiplexagem de ordem superior

Para multiplexar um maior número de canais básicos do que aquele que o sistema primário admite (30 no sistema Europeu e 24 no sistema Americano) recorre-se à hierarquização por estágios sucessivos de multiplexagem. Assim, as saídas de multiplexadores primários são por sua vez multiplexadas num multiplexador de segunda ordem apresentando, necessariamente, um ritmo agregado de saída mais elevado. A figura 6.11 ilustra a hierarquia do sistema Europeu de multiplexagem PDH¹¹ em que a ordem dos multiplexadores é identificada pelas designações M01, M12, M23, etc., e os ritmos normalizados são designados sucessivamente pelos identificadores E1, E2, E3, etc. Na versão Americana desta hierarquia,

¹¹*Plesiochronous Digital Hierarchy* ou Hierarquia Digital Plesiócrona

muitas vezes designada hierarquia AT&T¹², os ritmos normalizados são identificados por T1, T2, T3, etc.

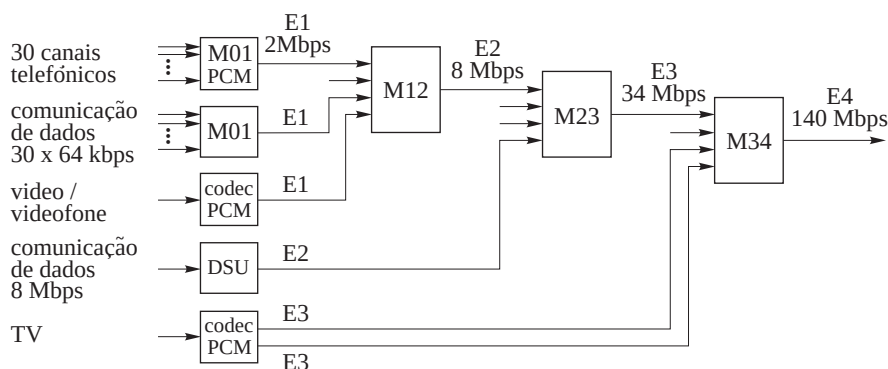


Figura 6.11: Exêmplo de uma multiplexação PDH Europeia

A tabela 6.1 indica os ritmos normalizados para cada um desses sistemas. Cada nível de multiplexação necessita também de dígitos de alinhamento

Tabela 6.1: Hierarquias de Multiplexação PDH

Ordem	Sistema Europeu ITU-T G.732			Sistema Americano ITU-T G.733		
	Entradas	Ritmo de saída (Kbps)		Entradas	Ritmo de saída (Kbps)	
1	30	2 048	E1	24	1 544	T1
2	4	8 448	E2	4	6 312	T2
3	4	34 368	E3	7	44 736	T3
4	4	139 264	E4	6	274 176	T4
5	4	564 992	E5			

da trama correspondente a esse nível, bem como de dígitos para a sinalização. Por essa razão a trama E2, por exêmplo, não é transmitida ao ritmo de $4 \times 2048 = 8192$ Kbps mas sim ao ritmo ligeiramente superior de 8448 Kbps.

¹²Os sistemas e normas de telecomunicações Americanos são muitas vezes associados à AT&T, a American Telegraph & Telephone, a maior Companhia e operadora de telecomunicações dos EUA que os concebeu e adoptou

Interessa notar que a partir da segunda ordem, os multiplexadores apenas lidam com sinais digitais, tanto à entrada como à saída. Aliás, actualmente, os codecs vêm já incluídos nos equipamentos terminais das fontes analógicas de modo que os próprios equipamentos multiplexadores de primeiro nível já só vêm preparados para entradas digitais e os esquemas das figuras 6.1 e 6.2 para estes multiplexadores já não são muito usados na prática, isto é, raramente, a não ser para aplicações muito especiais, o multiplexador inclui o codec.

Donde resulta que a forma mais prática de organizar as tramas passa a ser por dígitos entrelaçados.

Se se pretender transmitir uma fonte com um débito nominal superior ao ritmo básico, como por exemplo um sinal de vídeo digitalizado, este teria de entrar directamente no nível M12.

Exemplo 6.1 *Um sinal de vídeo representando imagens em movimento de 300×400 pixels¹³ por imagem com 8 tonalidades de cinzento (3 bits por pixel) a 16 imagens por segundo, constitui uma fonte com um débito binário de*

$$r_b = 300 \times 400 \times 3 \times 16 = 5\,760 \text{ Kbps}$$

É comum conseguir-se uma codificação binária comprimida de aproximadamente 30% pelo que o ritmo binário de transmissão no canal seria de

$$r_c = 0.3 \times 5760 = 1\,728 \text{ Kbps}$$

exigindo $N = 1\,728/64 = 27$ canais básicos para a sua transmissão. O codec de vídeo, neste caso, teria de organizar as amostras para as distribuir por esse número de canais e teria de possuir 27 saídas básicas.

Alternativamente, o sinal digitalizado poderia entrar directamente no nível primário de 2 Mbps, M12. Neste caso o codec teria de possuir um formatador de trama de acordo com a estrutura primária normalizada bastando possuir apenas uma saída primária.

As infraestruturas de transmissão digital das operadoras de telecomunicações estão estruturadas segundo esta hierarquia pelo que o utente (assinante) deverá possuir o equipamento terminal apropriado ao serviço que pretende utilizar. Se o equipamento que constitui a fonte de informação que se pretende transmitir não formata a saída de acordo com o serviço

¹³pixel é uma abreviatura de *picture element*, ou seja, elemento de imagem

que pretende utilizar (E1, E2, etc), então terá de se intercalar entre esse equipamento e o serviço um equipamento que o faça. Esse equipamento é designado genericamente por DSU (Digital Service Unit). Na figura 6.11 exemplificam-se alguns tipos de fontes de sinal e o nível da hierarquia que normalmente utilizam.

Anisocronismo das tributárias

Os multiplexadores do nível imediatamente inferior a um determinado nível de multiplexagem são designados de *tributárias* deste nível.

Na construção de um multiplex de ordem n a partir das tramas de ordem $n - 1$ é-se confrontado com o problema do *anisocronismo das tributárias*. Com efeito, as tramas que vão ser agrupadas no nível n podem ter origem em equipamentos terminais geograficamente distantes e cujos relógios possuam frequências não exactamente iguais (tributárias *plesiócronas*¹⁴) ou, na melhor das hipóteses, possuam frequências iguais (tributárias *isócronas*) mas estejam desfasados entre eles. O desfasamento, que é um atraso relativo, pode mesmo variar ligeiramente no tempo. Esta variação do atraso tem o nome de *jitter*.

No entanto, como é fácil de concluir, a multiplexagem síncrona a qualquer nível n exige um perfeito *sincronismo* dos bits, isto é, que cada bit se apresente no instante ou intervalo de tempo que lhe está destinado. Face à tecnologia que é hoje utilizada na realização física dos multiplexadores, baseada em microprocessadores que incluem memórias *buffer* de entrada que se comportam como *memórias elásticas*¹⁵, esse sincronismo é relativamente simples de obter pois os bits são prévia e temporariamente memorizados nos buffers e só são de lá retirados no instante exacto da respectiva inclusão na trama de saída, o que é feito sob control do software (ou *firmware*) do multiplexador.

Para compensar a tolerância de variação de ritmo admissível nas tributárias, o ritmo nominal de saída dos multiplexadores é ligeiramente superior ao da soma dos ritmos nominais das entradas.

Isto significa que, em média, de tempos a tempos, o multiplexador não tem bits disponíveis nalguns dos seus buffers de entrada nos instantes em que esses bits deviam passar para a trama de saída. Nestas ocasiões, o

¹⁴do grego, *plēsio* (quase ou próximo) + *kronos* (tempo)

¹⁵são filas de espera

multiplexador insere nesse intervalo um *bit de recheio*¹⁶, isto é, um valor qualquer, mas tem de *sinalizar* que nesse intervalo de bit o valor não corresponde ao da entrada e deve ser ignorado.

Assim, quando o ritmo de uma tributária é inferior ao nominal, mas ainda dentro da tolerância, a frequência de *bits de recheio* na trama de saída correspondentes a essa tributária, é elevado, e quando aquele ritmo é superior ao nominal, a frequência de *bits de recheio* é pequena ou nula. O limite superior da tolerância de ritmo de uma tributária é aquele para o qual o multiplexador deixa totalmente de introduzir *bits de recheio* e o limite inferior é aquele para o qual o multiplexador introduz o número máximo de *bits de recheio* que é de um bit por trama por tributária.

É pelo facto de ocorrer plesiocronismo nas tributárias a cada nível desta hierarquia que ela toma o nome de Hierarquia Digital Plesiócrona ou PDH.

Estrutura da trama PDH de segunda ordem a 8 Mbps

A figura 6.12 representa a estrutura das tramas E2, ou de 8 Mbps, que constituem a segunda ordem da hierarquia Europeia, definida na Recomendação G.742 da ITU-T, e constitui um exemplo de multiplexagem com recheio. Estas tramas designam-se, em geral, de tramas de recheio (ou *stuffing frames*). As especificações deste nível são as seguintes:

- ritmo binário do multiplex, $r_M = 8448$ Kbps, toler: $\pm 30 \times 10^{-6}$.
- número de bits por trama: 848 bits, e portanto $T_{trama} \approx 100.4 \mu s$.
- número de tributárias a 2048 Kbps: 4.
- estrutura da trama: bits entrelaçados, um por tributária.
- alinhamento da trama: padrão de 10 bits contíguos no início.
- bits por tributária por trama: 206 (205 caso bit de recheio presente).
- sinalização de recheio: 3 bits por tributária, distribuídos, com decisão tomada por maioria.

A utilização de 3 bits de sinalização de recheio por tributária destina-se a proteger esta sinalização dos erros de transmissão. A decisão por maioria

¹⁶ *stuffing bit*

consiste em considerar que existe bit de recheio na trama corrente, para uma determinada tributária, se pelo menos dois dos bits de sinalização correspondentes a essa tributária tiverem o valor 1. Os bits de recheio, quando ocorrem, ocorrem logo a seguir ao terceiro bit de sinalização. Na trama exemplificada na figura 6.12 foi introduzido um bit de recheio no fluxo da tributária II, o que está indicado pelo valor 1 dos 3 bits de sinalização correspondentes.

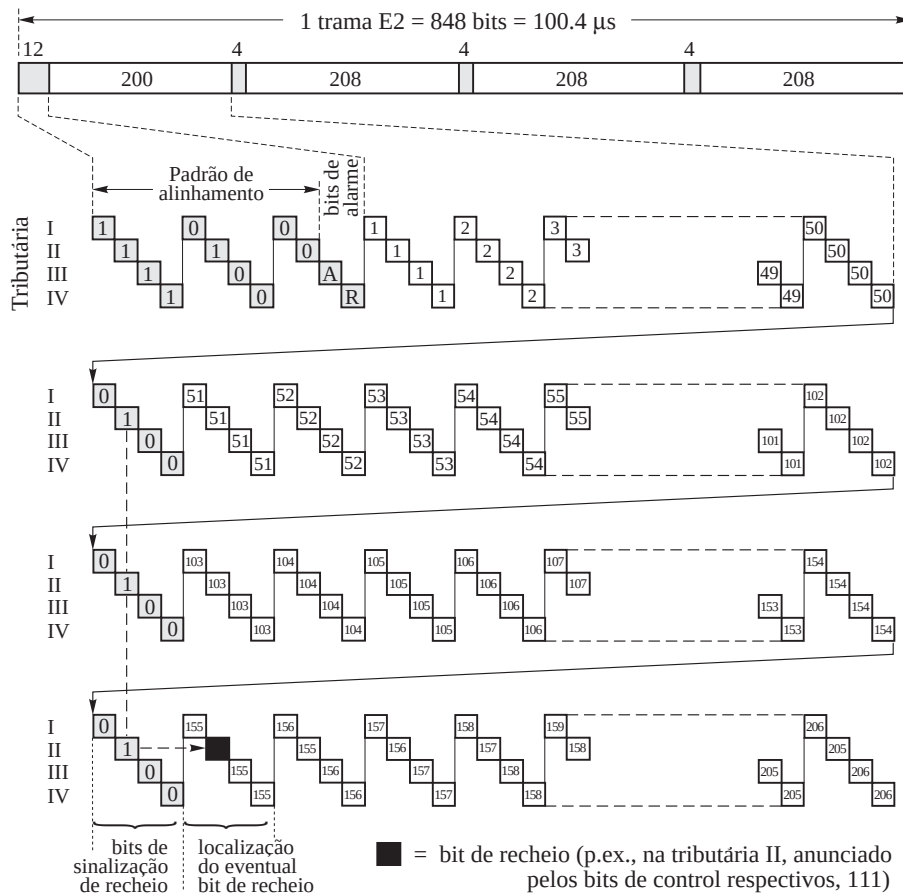


Figura 6.12: Formato da trama de multiplexagem PDH de 8 Mbps

Destas características podem retirar-se as seguintes conclusões:

- a) a trama E2, de 100.4 μ s, não tem qualquer relação com as tramas de amostragem das tributárias E1, de 125 μ s. O multiplex secundário

ignora a estrutura das tramas primárias e considera apenas o fluxo dos bits individualmente.

- b) a capacidade máxima de compensação através do mecanismo de recheio é, para cada tributária independentemente, de 1 bit em cada 212 bits, o que permite compensar uma diferença relativa de 0.47 % entre o ritmo da tributária, r_T , e o ritmo que lhe está atribuído, que é de $r_M/4$.
- c) para o ritmo primário nominal de $r_T = 2048$ Kbps, é necessário emitir, em média, $r_T \cdot T_{trama} = r_T \cdot (848/r_M) = 205 \frac{19}{33}$ bits significativos por trama, por tributária, o que significa que, em média, 14 tramas em 33 contêm um bit de recheio.

Arquitectura dos multiplexadores

Os equipamentos multiplexadores são basicamente constituídos por uma configuração de microprocessador digital programável e portas série de entrada/saída utilizando USARTs¹⁷ às quais estão associadas *memórias buffer*, como se ilustra na figura 6.13. Cada USART, independentemente

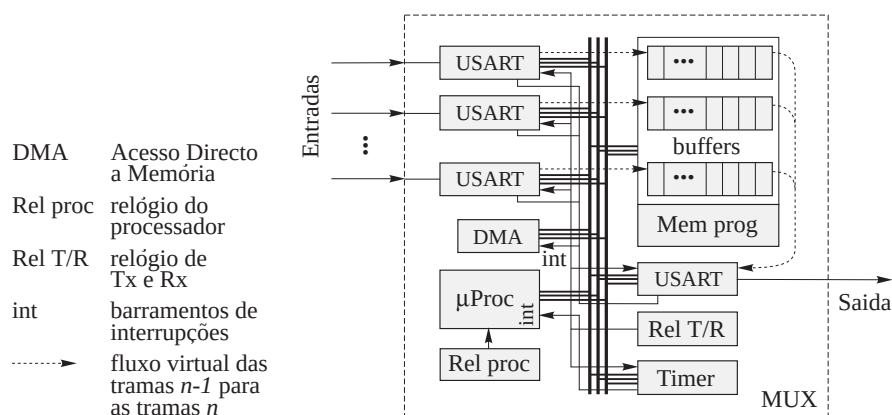


Figura 6.13: Multiplexador baseado em microprocessador

das restantes, recebe os bits das tramas $n - 1$ da tributária que está ligada à respectiva porta de entrada e, através de interrupções a uma unidade

¹⁷Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter

de *acesso directo a memória*, DMA¹⁸, coloca-os no *buffer* correspondente. Os *buffers* são zonas pré-definidas da memória, um por cada porta de entrada devendo cada um deles possuir uma dimensão tal que lhe permita armazenar alguns bits do nível $n - 1$.

O processador percorre ciclicamente todos os *buffers* lendo um bit de cada um deles e compõe a trama do nível n à medida que a vai transmitindo pela respectiva USART de saída.

Estas arquitecturas e, de uma maneira geral, quaisquer arquitecturas de equipamentos de comunicações, incluem um sub-sistema de transmissão/recepção de bits constituído por USART, *buffers*, processador DMA, processador de interrupções e relógio do processador e um sub-sistema de temporização das tramas constituído por um relógio (T/R) e por *timers* destinados a marcar os ritmos da transmissão/recepção.

Comunicação duplex

Por forma a permitir uma comunicação duplex em cada canal, torna-se necessário prover, a cada nível de multiplexagem e por cada multiplexador, um desmultiplexador que interligue os mesmos canais em sentido inverso. O desmultiplexador é normalmente designado *multiplexador inverso*. A figura 6.14 ilustra esta situação e em que ambas estas funções es-

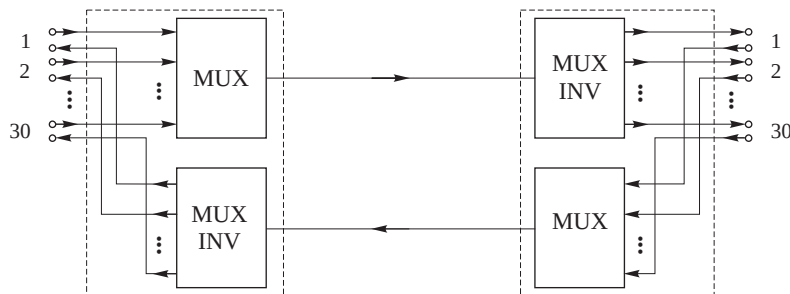


Figura 6.14: Duplexidade dos multiplexadores

tão integradas num mesmo equipamento (indicado a tracejado na figura). Muitas vezes, mas nem sempre, os equipamentos multiplexadores vêm já preparados para funcionar em duplex, mais propriamente, em *full-duplex*.

¹⁸Direct Memory Access

Assim, cada uma das 30 portas indicadas na figura é uma porta bidireccional. A interligação entre os multiplexadores faz-se, por exemplo, através ou de um par de fios para cada sentido (4 fios), ou de um par de fios para ambos os sentidos (2 fios) onde os dois sentidos são multiplexados em frequência (como se verá mais adiante), ou de uma fibra óptica para cada sentido. Na figura 6.14 cada linha com uma seta representa, obviamente, ou um par de fios condutores ou uma fibra óptica.

6.2.6 Hierarquia de multiplexagem SDH e SONET

As duas hierarquias PDH referidas nas secções anteriores são um exemplo da multiplicidade de sistemas TDM distintos que realmente existem na prática, o que dificulta a sua interoperação. Por outro lado, a evolução da tecnologia óptica e a sua crescente disponibilidade, permitindo a utilização de ritmos binários muito superiores, criou a oportunidade de repensar a normalização e de se conceber um sistema *padrão* de multiplexagem TDM. A iniciativa partiu das operadoras de telecomunicações norte-americanas, que propuseram a norma SONET (*Synchronous Optical NETwork*), a que se juntou a ITU que produziu a série de Recomendações G.707, G.708 e G.709 normalizando o sistema a que chamou SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*). Na altura em que se iniciou a definição SONET/SDH, os níveis E4 e T4 não eram praticamente utilizados devido a dificuldades de os realizar com tecnologia eléctrica.

O desejo de uniformidade absoluta não foi, porém, completamente conseguido (como é tradicional!) mas estas duas normas apenas diferem em aspectos não essenciais, pelo que, numa abordagem necessariamente introdutória, as diferenças não serão praticamente notórias.

Os principais objectivos da concepção dos sistemas SDH e SONET foram:

- (i) a adopção de uma hierarquia única para TDM síncrono.
- (ii) a continuação da hierarquia até e para além do gigabit/seg (Gbps).
- (iii) permitir a multiplexagem directa de canais muito mais lentos nos níveis superiores.
- (iv) o enriquecimento da estrutura de sinalização de modo a suportar melhor serviços de administração, operação e manutenção do sistema.

- (v) permitir o transporte de tráfego assíncrono (estatístico) e que tal se efectue de forma rentável (eficiente).

Definições

Um sistema SDH/SONET é constituído, em geral, por multiplexadores, repetidores e comutadores. A figura 6.15, que representa o modelo de referência funcional e terminológico definido na Recomendação G.803 da ITU, mostra um *caminho* entre dois equipamentos terminais ligados a um sistema SDH/SONET. Cada equipamento terminal está ligado a um multiplexador que por essa razão se designa por multiplexador terminal. No trajecto entre os mux terminais existem repetidores-regeneradores de sinal e multiplexadores ou comutadores intermédios.

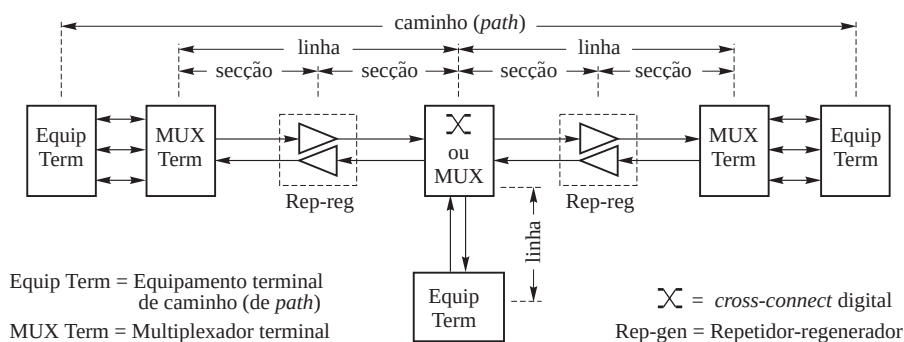


Figura 6.15: Definições de secção, linha e caminho no SDH e SONET

Nestes sistemas, a fibra óptica ininterrupta que liga dois quaisquer destes dispositivos é designada de *secção*. O trajecto entre dois mux ou comutadores, tenha ou não repetidores intercalados, é uma *linha*. E o trajecto entre equipamentos terminais, eventualmente com um ou mais mux e repetidores, é chamado um *caminho*, ou *path* que é o termo original em língua inglesa.

Formato das tramas SDH e SONET

As tramas básicas SDH e SONET são constituídas por blocos de 810 bytes de 125 μ s de duração. Esta duração da trama coincide com o período de amostragem dos canais PCM e portanto também são produzidas 8000

tramas por segundo. Tratando-se de sistemas síncronos, as tramas são sempre emitidas, continuamente, quer haja informação útil a ser transmitida quer não.

As tramas são descritas nas normas através de uma matriz de bytes com 90 colunas e 9 linhas. A figura 6.16 mostra duas dessas tramas. Os bytes são transmitidos da esquerda para a direita, por linhas, começando na primeira linha.

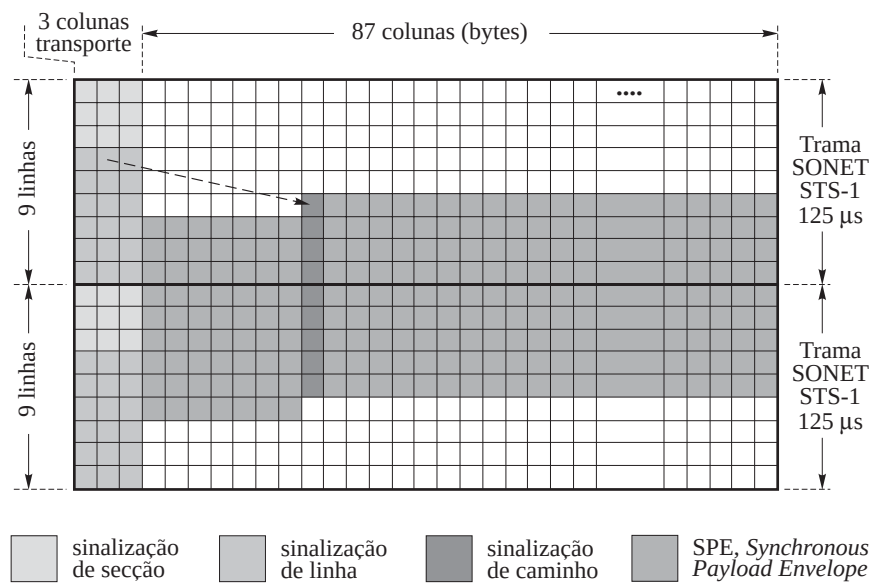


Figura 6.16: Duas tramas SONET STS-1 contíguas

Como são transmitidos $810 \times 8 = 6480$ bits em 125μ s o ritmo binário bruto é de 51.84 Mbps que é o ritmo do *canal* básico SONET e a trama correspondente é designada STS-1 (Synchronous Transport Signal-1). Todos os restantes ritmos são múltiplos do STS-1.

Em cada trama, os bytes das três primeiras colunas estão reservados para a gestão do sistema. Destes, os das três primeiras linhas, isto é, os bytes de ordem 1,2,3, 91, 92, 93, 181, 182 e 182, são destinados a sinalização de secção e os das seis linhas seguintes, isto é, os de ordem 271, 272, 273, 361, ..., 723, estão reservados para sinalização de linha.

Estes bytes constituem o que se designa por *overhead*, termo utilizado para referir tudo aquilo que não constitui informação útil dos utilizadores

originada nas entradas ou destinada às saídas dos equipamentos terminais. Trata-se de redundância, necessária para a gestão e operação do sistema, mas que contribui para baixar o seu rendimento (*utilização*), sob o ponto de vista desses equipamentos terminais.

Os bytes de *overhead* de secção são gerados e verificados no início e no final de cada secção e os bytes de *overhead* de linha são verificados no início e no fim de cada linha.

As restantes 87 colunas transportam $(87 \times 9 \times 8) / 125 \times 10^{-6} = 50.112$ Mbps de dados de utilizador — as origens/destinos ligados aos equipamentos terminais. Contudo, estes dados, designados SPE (Synchronous Payload Envelope)¹⁹, não têm necessariamente de começar ou ser inseridos na coluna 4 da linha 1. O SPE pode começar em qualquer posição dentro da trama. Para isso, a primeira linha do *overhead* de linha contém um apontador para o primeiro byte do SPE como se exemplifica na figura 6.16. A primeira coluna ocupada pelo SPE contém *overhead* de *path*. São bits para sinalização entre os equipamentos terminais desse caminho.

O facto do SPE poder começar em qualquer posição de uma trama e de se estender por duas tramas como mostra a figura 6.16 torna o sistema mais flexível. Se os dados (uma *payload*) chegam a um mux quando está a ser formada uma trama, eles podem ser imediatamente inseridos nessa trama em lugar de terem de esperar pelo começo da seguinte. Esta característica também se torna útil quando a *payload* não cabe exactamente numa trama como é o caso, por exemplo, duma fonte ATM cujos dados vêm organizados em células contíguas de 53 bytes. A primeira linha do *overhead* de linha pode então apontar para o início da primeira célula completa.

Hierarquias SDH e SONET

Os sistemas SDH e SONET estão organizados hierarquicamente como mostra a tabela 6.2. A multiplexagem em cada nível é feita por bytes entrelaçados. O *signal* STS-3 resultante da multiplexagem de três entradas STS-1 é uma trama de 270 colunas por 9 linhas a qual, sendo transmitida em $125 \mu\text{s}$, define para aquele sinal o ritmo de 155.52 Mbps.

¹⁹os dados úteis em sistemas de telecomunicações são geralmente chamados, na terminologia inglesa, de *payload*, querendo-se com isso significar *carga-taxada*, a carga da responsabilidade do utilizador

O sistema SDH só começa nos 155.52 Mbps e o respectivo nível é designado STM-1 (Synchronous Transfer Mode-1).

Tabela 6.2: Hierarquias de Multiplexagem SDH e SONET

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

Ao sinal STS-*i* transmitido sob a forma óptica o sistema SONET designa por OC-*i* (Optical Carrier-*i*). O sistema SDH só define sinais portadores ópticos.

A tabela também mostra, para cada nível, os ritmos brutos (na linha de transmissão), os ritmos de SPEs e os ritmos úteis que se obtêm à saída dos caminhos. A figura 6.17 ilustra uma situação de multiplexagem hierárquica SDH.

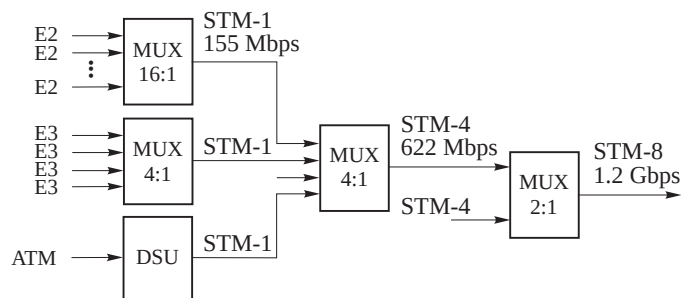


Figura 6.17: Multiplexagem hierárquica SDH

Quando um sinal (ou *carrier*), como por exemplo o STS-3 ou o OC-3, não resulta de uma multiplexagem mas transporta dados de uma única fonte, identifica-se esse facto adicionando a letra *c*, significando *concatenação*,

à sua designação. Assim, STS-3 e OC-3 indicam sinais de 466.56 Mbps e 155.52 Mbps resultantes da multiplexagem de três sinais distintos, respectivamente, STS-1 e OC-1, mas STS-3c e OC-3c indicam sinais de uma única fonte a 466.56 Mbps e 155.52 Mbps respectivamente. A quantidade de dados úteis num sinal concatenado STS- i c é ligeiramente superior ao de um STS- i visto que só existe uma coluna de *overhead* de *path* no SPE em lugar de três. Por exemplo, um OC-3c oferece 260 colunas para dados do utilizador, das 270 disponíveis na trama, enquanto que um OC-3 apenas oferece 258.

6.3 TDM estatístico

A multiplexagem síncrona é apropriada para a transmissão digitalizada de fontes que produzem informação a um ritmo contínuo ou regular, isto é, sem interrupções. Existem situações, porém, em que as fontes (equipamentos terminais) não se comportam dessa maneira. É o caso, por exemplo, dos computadores, dos terminais de dados, das estações de trabalho de computação, etc., em que o tráfego de dados que produzem tem origem nas aplicações de comunicações que os utilizadores invocam, como sejam, a transferência de ficheiros, o correio electrónico, o acesso por terminal remoto, etc. Este tráfego é de natureza aleatória e o multiplexador pode tirar partido desse facto alocando dinamicamente as ranhuras temporais das tramas de saída de acordo com a existência ou não de dados em cada instante nos *buffers* de entrada e com o seu estado de ocupação. A multiplexagem efectuada segundo este princípio designa-se por multiplexagem estatística ou assíncrona.

6.3.1 Características do tráfego gerado por computadores

Verifica-se que o tráfego de dados gerado pelas comunicações entre computadores é intermitente não-regular, de carácter aleatório, com um elevado *factor de crista*, isto é, a razão entre o ritmo binário nominal e o ritmo binário médio é muito maior que 1. A figura 6.18 ilustra esta característica. Na realidade, este tipo de tráfego de dados é caracterizado por sequências de bits contíguos intercaladas por longos períodos de ausência de transmissão, isto é, os dados aparecem aos mólhos (*bursts*): ou há transmissão — intervalos de tempo τ_i — e ela efectua-se ao ritmo nominal, r_b , ou não há transmissão — restantes intervalos de tempo. A duração

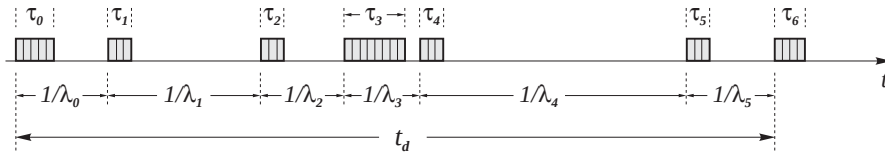


Figura 6.18: Característica intermitente das transmissões por computador

das intermitências, $1/\lambda_i - \tau_i$, é aleatória e o ritmo médio, considerando um intervalo de tempo t_d suficientemente grande, é definido por

$$\bar{r}_b = \frac{\text{<número de bits transmitidos durante } t_d\text{>}}{t_d} \quad (6.2)$$

e o factor de crista, fc ,

$$fc = \frac{r_b}{\bar{r}_b} = \frac{t_d}{\sum_i \tau_i} \gg 1 \quad (6.3)$$

ou seja, os equipamentos terminais apenas transmitem durante uma fracção do tempo cujo valor médio é

$$\alpha = \frac{1}{fc} \quad \text{donde} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (6.4)$$

Uma outra característica importante diz respeito à *unidade de dados* objecto de transmissão. Quando um equipamento transmite, nunca emite apenas um bit. Ou emite oito bits seguidos (*byte*), ou um múltiplo de bytes seguidos ou vários bits seguidos em número não necessariamente múltiplo de oito. Uma unidade de dados (ou *Data Unit*, DU) é um conjunto de bits emitidos consecutivamente que deve ser tratado e interpretado sempre como um todo. As DU poderão ter um número fixo ou um número variável de bits consoante as regras protocolares adoptadas em cada situação, dizendo-se de comprimento fixo ou de comprimento variável, respectivamente. As DU, especialmente as de comprimento variável, costumam-se por vezes designar genericamente por *mensagens*. Na figura 6.18 os intervalos de tempo entre emissões de DUs foi designado por $1/\lambda_i$ segundos pelo que o valor médio de λ_i é o número médio de DUs produzidas por segundo.

6.3.2 Multiplexagem estatística

O multiplexador estatístico (ou assíncrono) explora esta característica do tráfego não regular, atribuindo ranhuras temporais da trama de saída às linhas de entrada que tenham tráfego nesse instante. Tal como o multiplexador síncrono, o multiplexador estatístico possui várias linhas de entrada e uma linha de saída multiplexada de ritmo mais elevado. A cada linha de entrada está associado um *buffer* destinado a armazenar temporariamente as unidades de dados que vão chegando até estas serem recolhidas para envio na trama de saída. No TDM estatístico, o facto de nem todos os equipamentos de entrada estarem a transmitir ao mesmo tempo, permite um ritmo nominal de saída inferior à soma dos ritmos nominais das entradas. Assim, um multiplexador estatístico pode utilizar um ritmo de saída inferior ao do multiplexador síncrono para o mesmo número e ritmos de entrada. Ou, alternativamente, para os mesmos ritmos de saída, o estatístico pode suportar um maior número de entradas. A figura 6.19 contrasta a multiplexagem (TDM) estatística com a síncrona mostrando quatro fontes e os dados por elas emitidos em quatro épocas

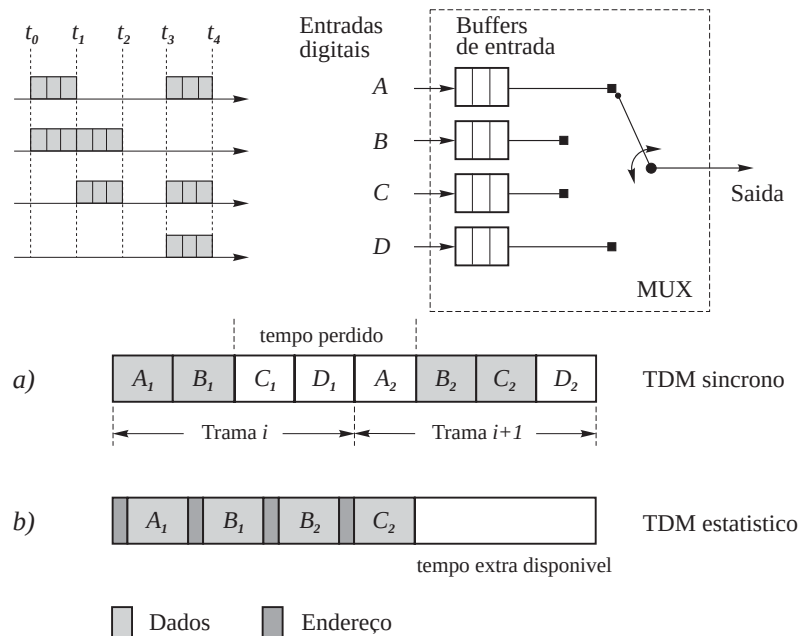


Figura 6.19: Contraste entre TDM síncrono e TDM estatístico

t_0 , t_1 , t_2 e t_3 regularmente espaçadas no tempo.

Se o multiplexador é síncrono, apresentará um ritmo de saída quatro vezes superior ao de cada entrada (supondo o destas iguais). Em cada época são preenchidas quatro ranhuras temporais da trama de saída. Na época t_1 duas dessas ranhuras ficam vazias, que é o caso da trama i na situação a), dado que os terminais C e D nada produziram na época t_0 .

Se o multiplexador é estatístico, não havendo mais dados de uma determinada época, passa aos da época seguinte não enviando ranhuras vazias. Na trama de saída são introduzidos dos dados de A e de B na época t_1 seguidos dos dados de B e de C na época t_2 e, não havendo dados na época t_3 , o multiplexador pode encerrar a trama e transmiti-la começando a formar uma nova trama a partir desse instante. Contudo, neste multiplexador perde-se o significado posicional das ranhuras, isto é, os canais não possuem uma posição pré-definida na trama TDM visto que tanto a chegada dos seus dados como a sua distribuição pelas tramas são imprevisíveis. Torna-se necessário fazê-los acompanhar do endereço, ou identificador, do canal a que pertencem. Esta informação extra constitui uma redundância (*overhead*) necessária mas mesmo assim poupa-se um certo tempo como se mostra na figura 6.19 b).

A estrutura da trama na multiplexagem estatística influencia o desempenho desta. É desejável minimizar o peso relativo dos dígitos de *overhead* podendo-se para isso transmitir o maior número possível de dados por cada entrada de cada vez. Como, no caso geral, o comprimento da trama não é fixo esta poderá necessitar tanto de um padrão de alinhamento inicial como de um padrão final para se poder determinar onde é que a trama acaba. A figura 6.20 mostra várias maneiras de construir uma trama de TDM estatístico. Na figura está-se a designar por *sub-trama TDM estatístico* ao conteúdo da trama entre padrões de alinhamento. Pode-se formar a sub-trama apenas com os dados de uma única entrada de cada vez, caso a), quando se pretende transmitir muitos dados por entrada de cada vez. Pode-se formar a sub-trama com dados de várias entradas, caso b), mas agora o multiplexador terá de retirar de cada *buffer* um número fixo de unidades de dados de cada vez de modo a se saber onde começam e onde acabam os dados (e os endereços) respeitantes a cada canal. Se isso não acontecer, então a estrutura dos dados de cada canal, para além de conter o endereço do canal terá de incluir um *campo de comprimento* que indique quantos, dos bits que se seguem, pertencem a esse canal e, por conseguinte, onde começa a ranhura do canal seguinte, caso c).

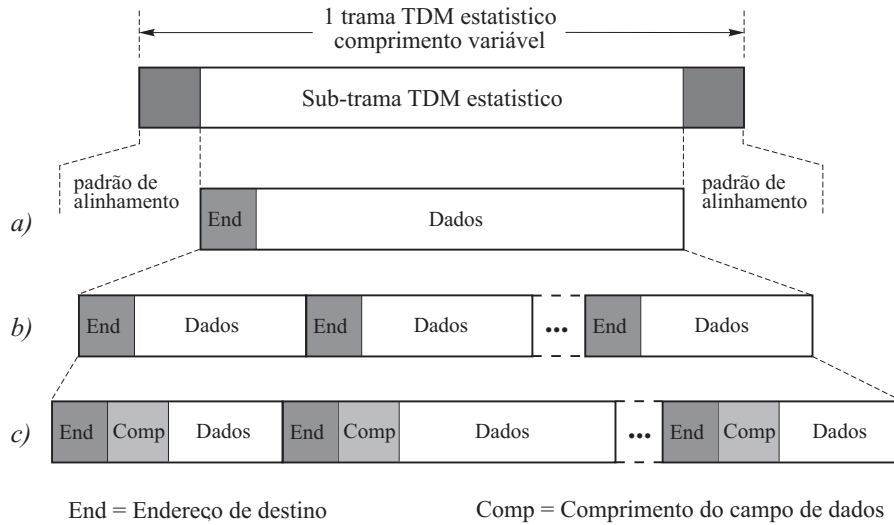


Figura 6.20: Formatos das tramas do TDM estatístico

Por sua vez, tanto o campo do endereço como o do comprimento, se este existir, podem ter comprimento fixo ou variável (ver problema 6.10). No campo do comprimento, por exemplo, pode convencionar-se que se os dois primeiros bits forem 11, esse campo tem um determinado número de bits que se lhe seguirão; e, se os dois primeiros bits forem 00, 01 ou 10, que apenas há esses dois bits para definir o comprimento, a que correspondem, respectivamente, uma, duas e três unidades de dados.

6.3.3 Desempenho

Referiu-se atrás que o ritmo nominal de saída do mux estatístico pode ser inferior à soma dos ritmos nominais das entradas. Isto é possível porque se prevê que o ritmo médio agregado das entradas seja inferior ao seu ritmo nominal agregado. Uma dificuldade, porém, reside no facto de que, devido à aleatoriedade, poderão ocorrer períodos de pico de tráfego durante os quais o tráfego de entrada excede a capacidade da saída. Os *buffers* de entrada destinam-se precisamente a armazenar temporariamente esse excesso de tráfego comportando-se como autênticas *filas de espera*.

Existe um compromisso entre o tamanho dos *buffers* a utilizar e o ritmo binário na linha de saída. A situação ideal seria ter *buffers* pequenos e

ritmos de saída baixos mas uma redução deste ritmo faz aumentar as filas de entrada. A preocupação em ter filas curtas não é tanto a poupança de memória *buffer* (a memória é barata) mas com o facto de que, quantos mais dados houver em *buffer*, maior é o atraso na sua entrega ao destino. De facto, o compromisso é entre o *tempo de resposta* do multiplexador, como sistema, e a velocidade de transmissão na linha multiplexada (ritmo nominal de saída).

Para analisar e quantificar este compromisso recorre-se à *teoria das filas de espera* que é a que melhor descreve o comportamento do multiplexador estatístico.

Modelo de filas de espera

Na teoria das filas de espera um sistema é constituído por uma ou mais *filas de espera* e por um ou mais pontos de *serviço*. Uma situação de fila de espera acontece quando, do exterior do sistema, chega, um *cliente* que pretende ser servido mas ao encontrar o servidor ocupado é forçado a esperar juntando-se a uma fila. Ao chegar a sua vez, cada cliente transita da fila para o ponto de serviço no qual é *servido*. Em geral o serviço consiste num certo número de *operações* elementares com uma determinada duração. Após ser servido o cliente sai do sistema.

Há várias configurações para um sistema de filas de espera: a de uma única fila para um único servidor; a de múltiplas filas para um único servidor; a de uma fila para vários servidores e a de várias filas para vários servidores. No entanto, a segunda configuração pode reduzir-se à primeira e a quarta à terceira ou à primeira. Assim, para efeitos de análise apenas duas são verdadeiramente distintas: a de fila única e servidor único e a de fila única e servidor múltiplo. Aquela que descreve o multiplexador estatístico é a de servidor único representada na figura 6.21.

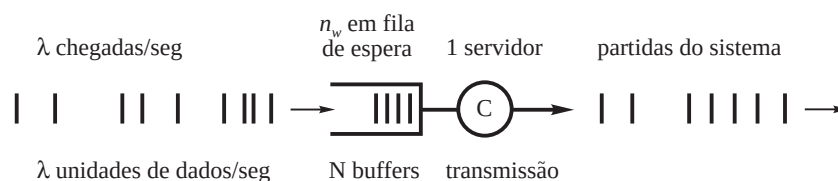


Figura 6.21: Modelo de fila de espera do MUX estatístico

Os clientes chegam ao sistema segundo uma determinada estatística a um ritmo médio de λ *chegadas por segundo*. O servidor possui uma capacidade de operação de C *operações por segundo* e o número de operações por cliente, que é imprevisível antes da sua chegada ao sistema, segue também uma determinada estatística com um valor médio de $1/\mu$ *operações*, isto é, cada cliente necessita, em média, de $1/\mu$ operações do servidor para ser considerado servido e sair do sistema. O tempo de serviço, S , é assim, em geral, uma variável aleatória cujo valor médio é

$$\bar{S} = \frac{1}{\mu C} \quad (6.5)$$

μC representa pois o número médio de clientes que o servidor serve por segundo. O servidor atende um cliente de cada vez, retirado da fila segundo uma determinada política, como por exemplo, a ordem de chegada²⁰, ou por prioridade segundo um critério pré-definido como por exemplo, o mais rápido primeiro²¹. É óbvio que quando o número médio de chegadas ao sistema excede o número médio de clientes que o servidor é capaz de despachar, a fila de espera tende a aumentar indefinidamente e diz-se que o sistema está em desequilíbrio. A condição para que um sistema de fila de espera esteja em equilíbrio é, portanto

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu C} = \lambda \bar{S} < 1 \quad (6.6)$$

O parâmetro ρ mede a utilização do servidor, ou seja, representa a fracção do tempo total que o servidor está ocupado.

Um sistema de filas de espera é identificado pela notação A/B/ m em que A designa a distribuição dos tempos entre chegadas, B a distribuição dos tempos de serviço e m o número de servidores. A e B tomam valores no conjunto de símbolos que representam a respectiva função de densidade de probabilidade (fdp) indicados na tabela 6.3 em que a função $\delta(x - 1/\mu)$ para a fdp determinística representa uma linha de altura unitária (impulso unitário) em $x = 1/\mu$.

O objectivo principal da teoria das filas de espera é o de se obter, para cada situação A/B/ m , as distribuições dos tempos e do número de clientes tanto em espera em fila, t_w e n_w , como no sistema, t_q e n_q , donde se possam determinar as várias médias estatísticas. O *atraso* sofrido por um cliente

²⁰FCFS, *First Come First Served* ou *FIFO, First In First Out*

²¹*shortest job first*

Tabela 6.3: Alguns modelos probabilísticos para filas de espera

Símb	Distribuição	fdp
M	Markoviana (exponencial)	$p(x) = \mu e^{-\mu x}$
E_r	Erlang de r estágios	$p(x) = \frac{r\mu(r\mu x)^{r-1}e^{-r\mu x}}{(r-1)!}$
H_R	Hiperexponencial, R estágios	$p(x) = \sum_{i=1}^R \alpha_i \mu_i e^{-\mu_i x}$
D	Determinística	$p(x) = \delta\left(x - \frac{1}{\mu}\right)$
G	Geral	$p(x)$ é arbitrária

é o tempo gasto à espera na fila mais o tempo que demora a ser servido, $t_q = t_w + S$, e o número de clientes no sistema é o número de clientes à espera em fila mais o que está a ser servido.

Modelo para o multiplexador estatístico

Considere-se que as unidades de dados têm um comprimento fixo de k bits. O multiplexador estatístico é modelado por um sistema de fila de espera de servidor único, onde os clientes são as unidades de dados que chegam a cada uma das suas N entradas ao ritmo médio de $\alpha r_{be}/k$ unidades por segundo. As N entradas são equivalentes a uma entrada única com chegadas ao ritmo médio $N\alpha r_{be}/k$ unidades de dados por segundo.

O serviço consiste na transmissão das unidades de dados para a linha de saída a um ritmo fixo de r_{bs} bps. Trata-se de um serviço de capacidade $C = r_{bs}$ efectuando $1/\mu = k$ operações por cliente. S é o tempo que demora a transmitir uma unidade de dados de k bits e é constante, portanto, determinístico.

O parâmetro ρ , neste caso, é a utilização da linha ou a fracção da capacidade total da linha de saída que está a ser usada. Estas correspondências traduzem-se nas seguintes equações:

$$\lambda = N\alpha \frac{r_{be}}{k} \quad (6.7)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{\mu C} = \frac{k}{r_{bs}} \quad (6.8)$$

$$\rho = \lambda \bar{S} = N \alpha \frac{r_{be}}{r_{bs}} \quad (6.9)$$

Considere-se as chegadas das unidades de dados aleatória (Poisson), ou seja, que os tempos entre chegadas — os valores $1/\lambda_i$ da figura 6.18 —, se distribuem segundo uma função exponencial negativa. Trata-se de um modelo aproximado para o comportamento das chegadas mas suficientemente realista na maior parte das situações. Considere-se também que as unidades de dados são transmitidas FCFS. O mux estatístico comporta-se então como um sistema M/D/1.

Um dos teoremas fundamentais da teoria das filas de espera é o Teorema de Pollaczek-Khinchin cujo resultado, que se apresenta sem demonstração, para o valor médio do tempo de espera em fila no sistema M/D/1 é

$$\bar{t}_w = \frac{\rho \bar{S}}{2(1 - \rho)} \quad (6.10)$$

O tempo médio total no sistema $\bar{t}_q$, ou tempo médio de atraso (*delay*), de uma unidade de dados será a soma do tempo médio de transmissão $\bar{S}$ com o tempo médio de espera em fila $\bar{t}_w$

$$\boxed{\bar{t}_q = \bar{S} + \frac{\rho \bar{S}}{2(1 - \rho)}} \quad (6.11)$$

Por outro lado, pelo teorema de Little, o número médio de clientes no sistema $\bar{n}_q$, é igual ao produto do ritmo médio de chegadas λ , pelo tempo médio de atraso no sistema $\bar{t}_q$, ou seja, $\bar{n}_q = \lambda \cdot \bar{t}_q$, o que dá para o número médio de unidades de dados no multiplexador

$$\boxed{\bar{n}_q = \rho + \frac{\rho^2}{2(1 - \rho)}} \quad (6.12)$$

A figura 6.22 representa graficamente as equações (6.12), número médio de unidades de dados no multiplexador, e (6.11), o tempo médio de atraso no multiplexador, neste caso para vários ritmos nominais de saída e unidade de dados de 1000 bits de comprimento, ambos em função da utilização do sistema, ou seja, da utilização da linha de saída, ρ . Esta figura realça a natureza do compromisso entre o *tempo de atraso* no sistema e a velocidade

na linha multiplexada. A utilização da linha é expressa em fracção da sua capacidade (ritmo nominal). Verifica-se que o tempo de atraso cresce de forma aproximadamente linear com a utilização até cerca de 0.6. A partir deste valor o crescimento aumenta rapidamente e, por consequência, a fila de espera (ocupação dos buffers) cresce também mais rapidamente. Uma utilização acima de 0.8 conduz a uma situação de instabilidade que deve ser evitada. Por estas razões se costuma considerar o valor de $\rho = 0.6$ como ponto óptimo de funcionamento de um sistema de fila de espera.

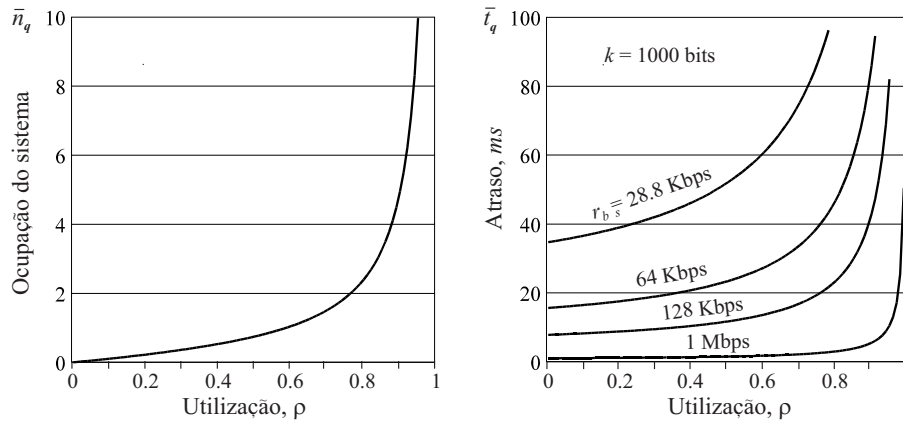


Figura 6.22: Ocupação e atraso médios no MUX estatístico

Para além dos valores médios das distribuições de n_q e de t_q , é importante, evidentemente, ter em consideração médias de ordem superior dado que tanto a ocupação dos buffers como o tempo de atraso, pela sua natureza estatística variam em cada instante podendo mesmo, ocasionalmente, atingir valores muito superiores ao da média. Quando isso acontece, no caso de n_q , é necessário ter espaço de reserva nos buffers para acomodar o excesso temporário de DUs, sob pena de sobrelotação (*overflow*) e da perda irremediável de DUs.

A partir da distribuição do número em fila, n_w , é possível determinar a probabilidade de n_w exceder um determinado valor, que é precisamente a probabilidade de *overflow* do buffer caso o seu comprimento seja exactamente esse valor. A expressão dessa distribuição para o sistema M/D/1 é relativamente complexa para ser aqui analisada, no entanto, representam-se na figura 6.23 gráficos para aquelas probabilidades em função do comprimento do buffer, para diversos valores da utilização.

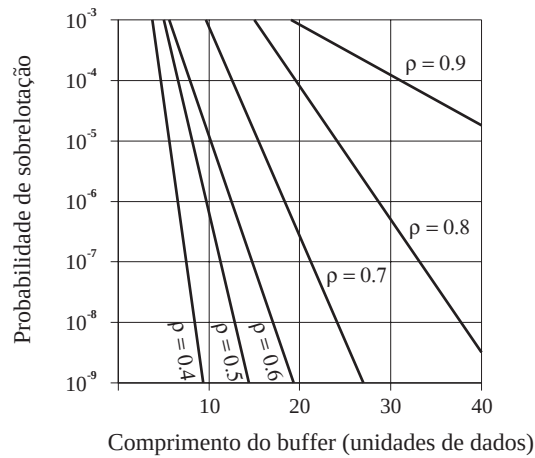


Figura 6.23: Probabilidade de sobrelotação (*overflow*) dos *buffers*

É fácil verificar que a variância do número em fila cresce com a utilização e por conseguinte o comprimento do buffer tem de crescer igualmente para cada determinado valor da probabilidade de sobrelotação. Pode-se, assim, determinar qual o tamanho que os buffers do multiplexador devem ter para se garantir uma taxa máxima de perda de unidades de dados ou, alternativamente, conhecido o comprimento dos buffers, determinar qual aquela taxa ou ainda, dimensionar o número de entradas, ou o ritmo de transmissão à saída de modo a se obter o desempenho desejado, etc.

Exemplo 6.2 Considere-se um multiplexador estatístico com entradas de 64 Kbps e saída a 128 Kbps. Suponha-se que os equipamentos ligados à entrada transmitem DUs de comprimento fixo igual a 1000 bits durante 40% do tempo a um ritmo aleatório (Poisson), isto é, com tempos entre emissões de DUs distribuídos segundo uma função exponencial negativa. Esta situação traduz-se nos seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 k &= 1000 && \text{bits} \\
 r_{be} &= 64000 && \text{bps} \\
 r_{bs} &= 128000 && \text{bps} \\
 \alpha &= 0.4
 \end{aligned}$$

donde o tempo médio de serviço, que é o tempo médio de transmissão de

uma unidade de dados é constante e igual a

$$\bar{S} = \frac{k}{r_{bs}} = \frac{1000}{128000} \approx 7.8 \text{ ms} \quad (6.13)$$

Considere-se agora os dois casos seguintes.

Caso 1: Estão três equipamentos ligados ao multiplexador, $N = 3$.

O ritmo médio de chegadas de DUs será de $\lambda = N\alpha r_{be}/k = 76.8 \text{ DU/s}$ e o coeficiente de utilização da linha multiplexada é $\rho = \lambda\bar{S} = 0.6$.

O tempo médio de atraso, que é o tempo médio de trânsito de uma DU pelo multiplexador, calculado da equação (6.11), é de $\bar{\tau}_q \approx 13.7 \text{ ms}$ e o número médio de DUs dentro do multiplexador, calculado pela equação (6.12), é de $\bar{\pi}_q = 1.05 \text{ DUs}$, ou seja, em média, estão 1050 bits dentro do multiplexador.

Para se garantir que a perda de DUs não excede uma em mil, os buffers de entrada terão de ter espaço para pelo menos 6 DUs, ou seja, 6000 bits (750 bytes), resultado obtido por leitura no gráfico da figura 6.23 para $\rho = 0.6$ e $P_{ovf} = 10^{-3}$.

Se se pretender uma menor taxa de perdas de DUs, por exemplo não inferior a uma em cem mil, então os buffers deverão ser de pelo menos 10000 bits (1.22 Kbytes).

Caso 2: Estão quatro equipamentos ligados ao multiplexador, $N = 4$.

O ritmo médio de chegadas e o coeficiente de utilização são superiores aos do caso anterior, como era de esperar, $\lambda = 102.4 \text{ DU/s}$ e $\rho = 0.8$. O tempo médio de atraso é agora quase o dobro, $\bar{\tau}_q \approx 23.4 \text{ ms}$, e o número médio de DUs dentro do multiplexador excede o dobro do caso anterior, $\bar{\pi}_q = 2.4 \text{ DUs}$.

Para garantir que a perda de DUs não excede uma em mil, os buffers de entrada terão de ter espaço para pelo menos 15 DUs, ou seja, 15000 bits (1.83 Kbytes), e para garantir uma taxa de perdas não inferior a uma em cem mil, os buffers terão de acomodar pelo menos 25 DUs, ou 25000 bits (3.125 Kbytes).

Seria, talvez, de esperar, que os valores obtidos para os comprimentos dos buffers em cada caso, fossem divididos proporcionalmente pelas entradas, isto é, por 3 e por 4 respectivamente. Estatisticamente tal só seria válido se o número de entradas fosse muito grande. No caso do exemplo, o buffer de cada linha de entrada deve ter o comprimento que foi calculado.

6.4 Multiplexagem por divisão da frequência

A multiplexagem de um meio de transmissão pode fazer-se também por divisão de frequência, FDM (ou WDM)²², a qual é possível quando a largura de banda útil excede a largura de banda exigida pelos sinais a transmitir. Vários *canais* FDM podem coexistir simultaneamente no mesmo suporte físico se os sinais correspondentes forem modulados em *portadoras* de diferentes frequências e estas forem suficientemente separadas por forma a que as bandas dos sinais não se sobreponham senão cada sinal original não poderá ser recuperado por filtragem.

6.4.1 Método

A figura 6.24 mostra os vários aspectos de um sistema FDM. Em *a*), vários sinais de banda base $x_i(t)$, $i = 1..N$, analógicos ou digitais, destinam-se a ser multiplexados no mesmo meio de transmissão. Supondo que estes sinais possuem a mesma largura de banda, B , com espectros $|X_i(f)|$ como se mostra em *b*), eles são previamente filtrados por filtros passa-baixo (FPB) de modo a eliminar todas as suas componentes acima de B Hz resultando o espectro que se mostra em *c*). Cada sinal $x_i(t)$ é modulado em onda contínua e em banda lateral única (BLU²³) numa portadora de frequência f_{spi} . A modulação em BLU consiste em retirar uma das bandas do espectro do sinal que foi gerada pela modulação. Recorde-se que a modulação adiciona, na banda das frequências positivas, a banda simétrica do sinal que se encontra no intervalo das frequências negativas. Embora simétricas essas duas bandas são iguais bastando transmitir uma delas para se replicar a outra no receptor. Poupa-se assim em largura de banda do canal. Tanto se pode filtrar a banda lateral superior como a inferior dizendo-se que a transmissão se faz, respectivamente, em USB ou LSB²⁴.

Visto serem utilizadas várias portadoras estas são designadas de *subportadoras* para se distinguir da modulação quando é efectuada para a transmissão. Pode ser utilizado qualquer tipo de modulação (amplitude, frequência ou fase). Com esta operação, cada sinal resultante $x_{spi}(t)$ possui

²²Frequency Division Multiplexing, também sendo usual a denominação *Wavelength Division Mutiplexing*

²³SSB, *Single SideBand*

²⁴*Upper SideBand* ou *Lower SideBand*

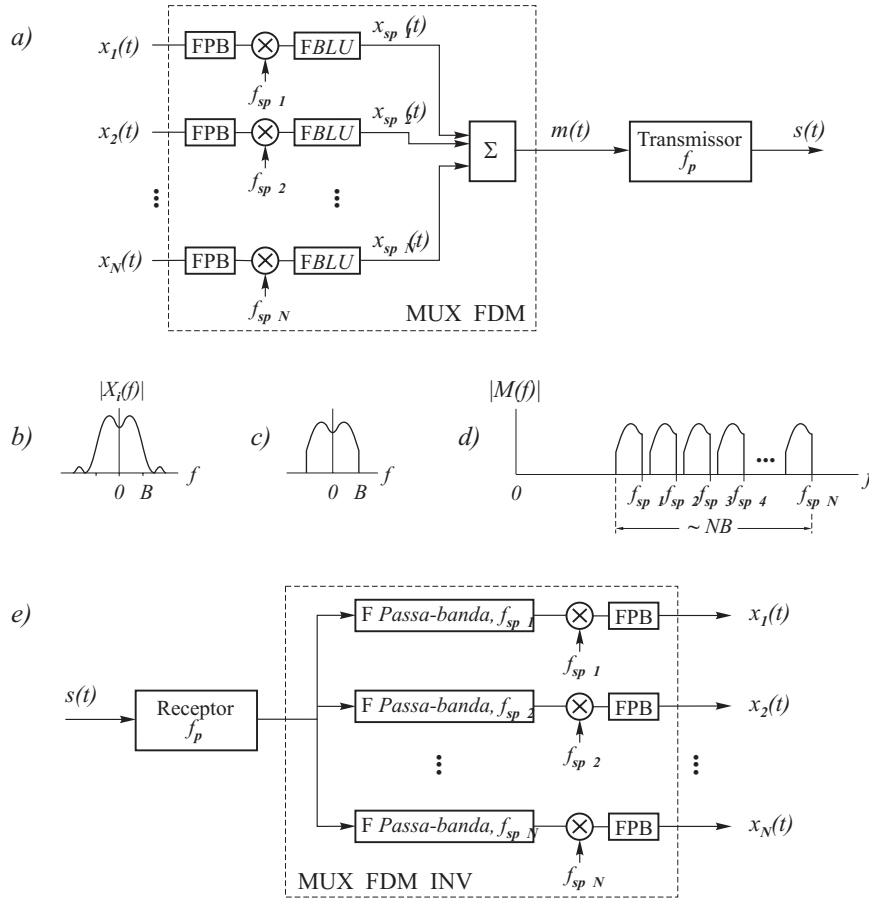


Figura 6.24: Multiplexagem por divisão de frequência, FDM

um espectro deslocado na frequência cujo limite superior é precisamente a frequência $f_{sp\ i}$ da portadora caso se tenha retirado a banda superior do sinal.

As frequências das subportadoras são escolhidas de modo a que as bandas de cada um dos sinais se situem umas imediatamente a seguir às outras, apenas com uma pequena banda de guarda entre elas. Os $x_{sp\ i}(t)$ são depois somados produzindo um sinal composto $m(t)$ cujo espectro $|M(f)|$ é o representado em d) na figura 6.24.

Por sua vez, o sinal composto $m(t)$ poderá ser modulado quer por uma outra subportadora de um nível superior de multiplexagem, quer por

uma portadora de transmissão no canal de acordo com a localização da banda de passagem deste. A largura de banda, B_m , de $m(t)$, será a soma das larguras de banda de cada um dos sinais nas subportadoras, $B_m = \sum_{i=1}^N B_{spi}$ ou seja, neste caso, $B_m \approx N B$.

Na recepção, depois da desmodulação de transmissão, retirada a portadora f_p , o sinal composto $m(t)$ é apresentado a uma bateria de N filtros passa-banda, cada um com largura de banda B e frequência superior igual a f_{spi} . Desta forma o sinal composto é dividido nas suas partes componentes. Cada componente é então desmodulada por uma subportadora com a mesma frequência superior do filtro e o sinal original desse canal $x_i(t)$ é assim recuperado como se mostra no esquema do multiplexador inverso na figura 6.24 e).

6.4.2 Hierarquias FDM

A tabela 6.4 resume as especificações das hierarquias de multiplexagem FDM americana e a normalizada pela ITU que é adoptada na europa.

Tabela 6.4: Hierarquias de Multiplexagem FDM

	Canais de voz	Largura de Banda	Espectro	Designação	
				Americana	ITU
1	12	48 KHz	60-108 KHz	Group	Group
2	60	240 KHz	312-552 KHz	Supergroup	Supergroup
3	300	1232 KHz	812-2044 KHz	—	Mastergroup
3	600	2520 KHz	564-3084 KHz	Mastergroup	—
4	900	3872 KHz	8516-12388 KHz	—	Supermaster group
×	$N \times 600$			Mastergroup multiplex	—
5	3600	16984 KHz	564-17548 KHz	Jumbogroup	—
6	10800	57442 KHz	3124-60566 KHz	Jumbogroup multiplex	—

Tal como no TDM, o canal básico de referência para a multiplexagem por divisão de frequência é o canal de voz de qualidade telefónica, isto é, o sinal de banda base com $B = 4$ KHz depois de filtrado, incluindo uma banda de guarda. As normas, tanto europeias como americanas, para a multiplexagem de primeiro nível, designado um *grupo*, multiplexa 12 canais de 4 KHz em subportadoras de 64, 68, 72, ..., 108 KHz, em banda

lateral inferior, resultando um sinal composto $m(t)$ com largura de banda $B_m = 48$ KHz e frequências limites da banda 60 e 108 KHz.

Formam-se multiplexes de nível superior tratando cada sinal $m_i(t)$ exactamente da mesma forma que se trataram os $x_i(t)$, isto é, modulando-os nas subportadoras definidas para esse nível. A norma para o segundo nível, um *supergrupo*, junta 5 entradas de banda [60, 108 KHz] para formar um sinal composto de largura de banda 240 KHz. As subportadoras que formam o *supergrupo* estão pois separadas de 48 KHz e são de 420, 468, ..., 612 KHz com a modulação também em banda lateral inferior.

Cada nível da hierarquia é identificado por um nome que é o indicado nas duas últimas colunas. Os sistemas diferem no nível de terceira ordem terminando as normas ITU no nível 4. O sistema americano admite multiplexes indefinidos desde que sejam múltiplos de um *Mastergroup*.

6.5 Problemas

- 6.1 – Pretende-se multiplexar cinco canais de voz telefónica limitados à banda de 4 KHz e um canal de música de alta fidelidade de 20 KHz de largura de banda. O multiplexador efectua a digitalização das entradas a 8 bits por amostra e transmite em PCM.
 - a) Esquematize a sequenciação do comutador de amostragem.
 - b) Defina um formato para a trama PCM do multiplexador.
 - c) Qual o ritmo r_c de transmissão de saída do multiplexador?
- 6.2 – Considere a estrutura da trama E1 da figura 6.6 bem como o algoritmo de alinhamento da figura 6.8 e mostre que o realinhamento de tramas E1 demora entre 250 e 375 μs .
- 6.3 – Qual o tempo máximo para se obter o alinhamento de tramas T1?
- 6.4 – Qual o ritmo de sinalização médio por canal de sinalização ao nível primário no sistema PDH Americano?
- 6.5 – Qual o ritmo disponível nos canais de sinalização do nível primário do sistema de multiplexagem PDH Europeu? Justifique.
- 6.6 – Quais as percentagens de redundância (*overhead*) nas linhas E1 e T1 respectivamente, isto é, que percentagem do ritmo nominal não é efectivamente utilizada para transmitir informação das fontes?

- 6.7 – O ritmo útil para o utilizador em STM-1 indicado na tabela 6.2 é de 148.608 Mbps. Mostre como é que este valor pode ser calculado a partir dos parâmetros do SDH STM-1.
- 6.8 – Se num sistema SDH os relógios apresentarem um *jitter* constante de 1 parte em 10^9 , quando é que o desvio (atraso ou avanço) iguala o tempo de 1 bit? Quais as implicações deste resultado?
- 6.9 – Qual o ritmo útil disponível numa ligação STM-4c?
- 6.10 – Os campos do endereço nas sub-tramas de multiplexagem estatística poderão ser reduzidos se se utilizar endereçamento relativo passando, possivelmente, a ter comprimento variável. Mostre como se pode efectuar esse endereçamento e, através de um exemplo, quantifique a redução de *overhead* que daí pode resultar.
- 6.11 – Sessenta terminais estão ligados a um concentrador. Metade deles transmite, em média, 1 mensagem cada 15 segundos e a outra metade, 1 mensagem cada 30 segundos, em média. O comprimento das mensagens é de 10 bytes. Determinar o atraso médio das mensagens no concentrador se a linha de saída transmite ao ritmo nominal de 60 bytes/s. Qual o número médio de mensagens dentro do concentrador?
- 6.12 – Repetir o Problema 6.11 para mensagens com metade do comprimento mas com taxa de chegadas dupla. Compare os resultados. Que conclusões pode tirar?
- 6.13 – Repetir o Problema 6.11 com todos os terminais a transmitir, em média, 1 mensagem cada 10 segundos utilizando mensagens de 8 bytes.
- 6.14 – Trinta terminais encontram-se ligados a um multiplexador estatístico. Cada terminal gera em média uma mensagem de comprimento fixo de 1200 bits (pacote) por minuto.
- Determinar a capacidade exigida para a linha de saída (ritmo nominal) de modo que a carga média no sistema, ou seja, o tráfego médio normalizado de saída seja de $\rho = 0.6$.
 - Determinar o tamanho que os buffers devem ter para que a probabilidade de sobrelotação (*overflow*) não exceda 0.0001.
 - Qual o atraso médio que se verifica neste caso?

- 6.15 – Representar graficamente os espectros dos sinais compostos de um grupo e de um supergrupo FDM. Quais das bandas laterais do sinal básico original estão presentes em cada caso?
- 6.16 – Mostre, através de gráficos espectrais, como é que um mux inverso de grupo FDM recupera ambas as bandas laterais dos sinais $x_i(t)$ e portanto, os próprios sinais originais.

fim do capítulo 6