

## Multiplexagem

- Capacidade do canal ( **$B_t$** ) >> Capacidade do fonte ( **$B$** )
- Mais que uma fonte partilha o mesmo meio de transmissão (canal)
  - Time Division Multiplexing (**TDM**) *TDMA*
  - Frequency Division Multiplexing (**FDM**) *FDMA*
  - Code Division Multiple Access (**CDMA**) *CDMA*

*MUX by using frequency, code, time, or spatial diversity*

### Advantages of multiplexing

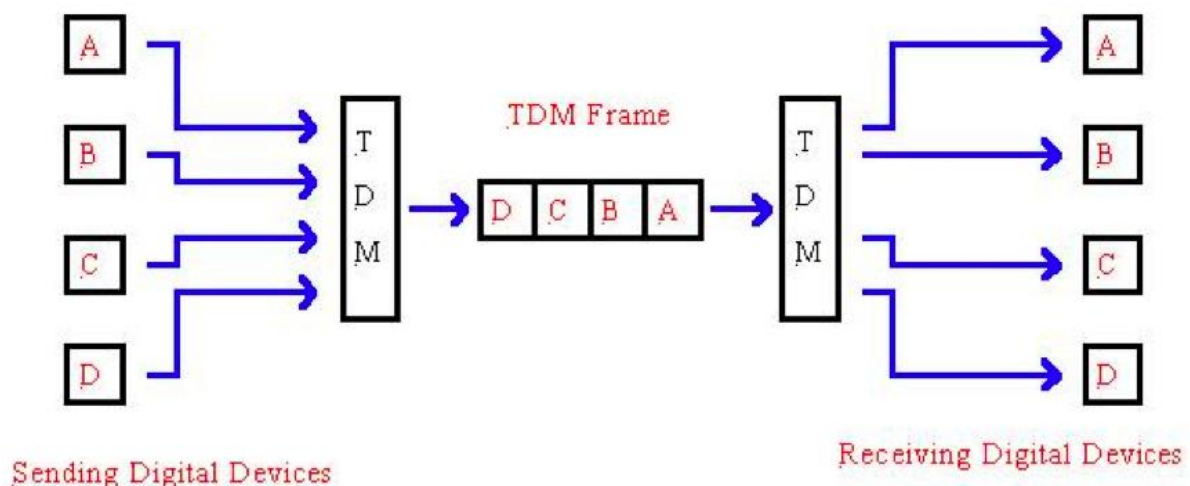
1. Multiple signals can be sent simultaneously over a single communication channel.
2. Effective use of channel bandwidth
3. Multiplexing reduces cost
4. Multiplexing reduces circuit complexity

### Applications of Multiplexing

1. Communication system
2. Computer memory
3. Telephone systems
4. TV broadcasting
5. Telemetry
6. Satellites

## TDM :

**Trama (Frame)** → Conjunto de informação ordenado no tempo



## TDM Sincrono

**Síncrono** (usado em fontes de dados com fluxo constante)

**Sincronização** com referências periódicas, i.e., V bits consecutivos no início (ou no meio) da trama (desalinhamento depois N ausências consecutivas (3))

relativamente simples obter o sincronismo nos multiplexadores atuais (com buffer)  
**USART**

**Canal básico** = 64 Kbps -- *timeslot*

capacidade do canal não é totalmente utilizada se fonte não tem dados a transmitir

Ritmo de transmissão no TDM :  **$R_c = N * F_a * k$**  : N - numero de fontes, k - dig/sim

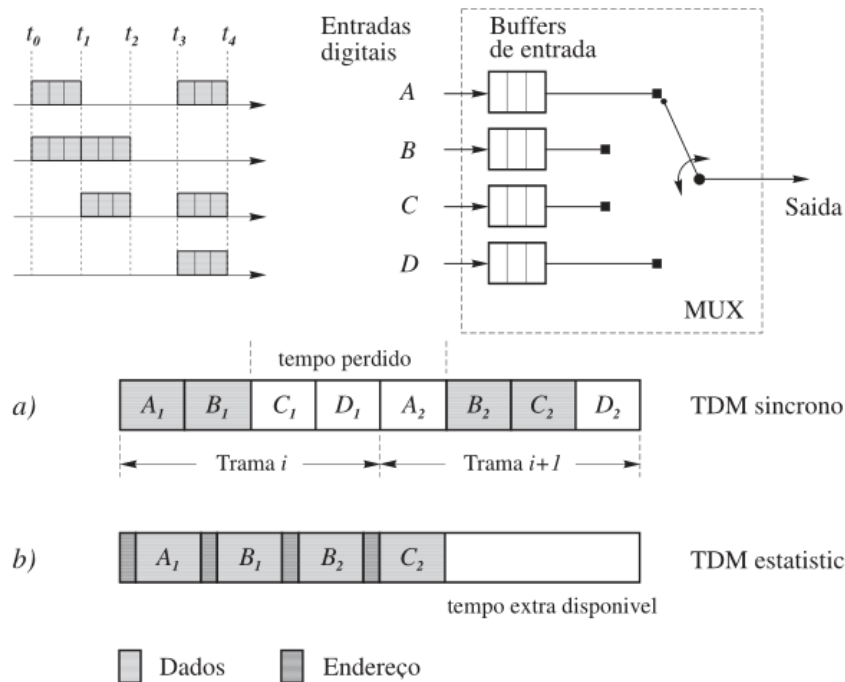
**Sinalização no canal** → troca de informação de controlo do equipamento

Comunicação **full-duplex / half duplex** (bidireccional)

SDH/SONET constituído por multiplexadores, repetidores e comutadores.

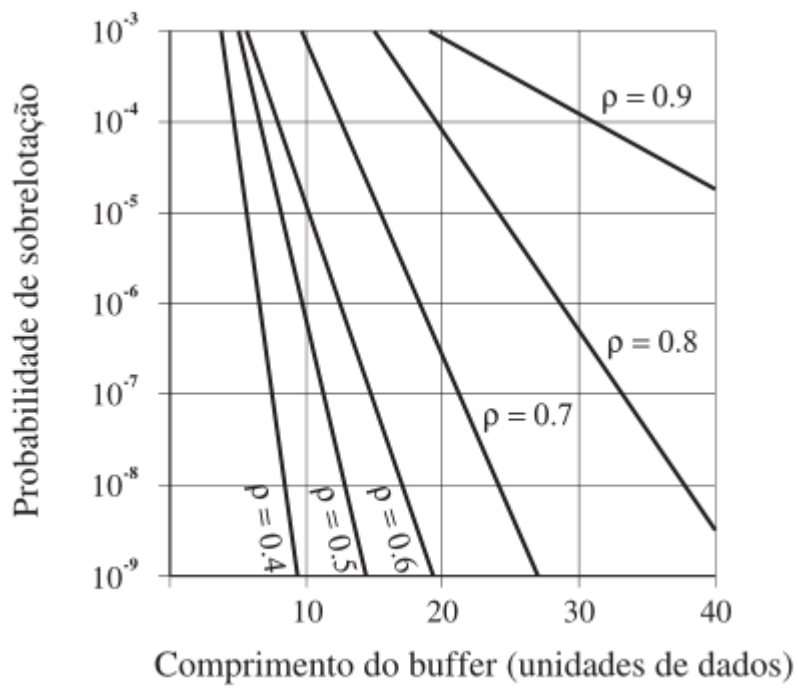
## TDM Assíncrono

- **Assíncrono** (fluxo de dados não constante (em *burst*)) supporta mais entradas
- Multiplexagem **estatística**
- **ritmo medio** = NumBits / tempo
- filas de espera (**buffers**) FIFO : provocam atraso na entrega
- número fixo de dados retirado cada vez (fronteiras) **ou** campo comprimento
- **overhead** necesario para identificar o canal pretendido (como minimizar?)



<b>Tempo médio de serviço :</b>	$\bar{S} = \frac{k}{r_{bs}}$	<b>k</b> - comprimento DU em bits <b>Rbs</b> - ritmo saída <b>Rbe</b> - ritmo de entrada
<b>Ritmo medio de chegadas:</b>	$\lambda = N \alpha \frac{r_{be}}{k}$	<b>N</b> - numero equip. ligados <b>a</b> - % tempo de funcionam.
<b>Coeficiente de utilização :</b>	$\rho = \lambda \bar{S}$	
<b>Tempo medio atraso UD:</b>	$\bar{t}_q = \bar{S} + \frac{\rho \bar{S}}{2(1 - \rho)}$	
<b>Número medio de UD no multiplexador :</b>	$\bar{n}_q = \rho + \frac{\rho^2}{2(1 - \rho)}$	

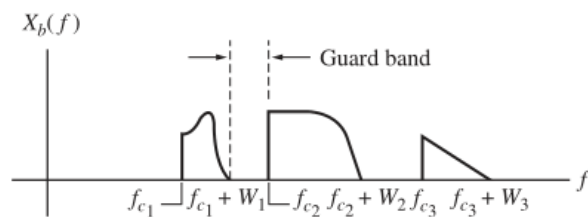
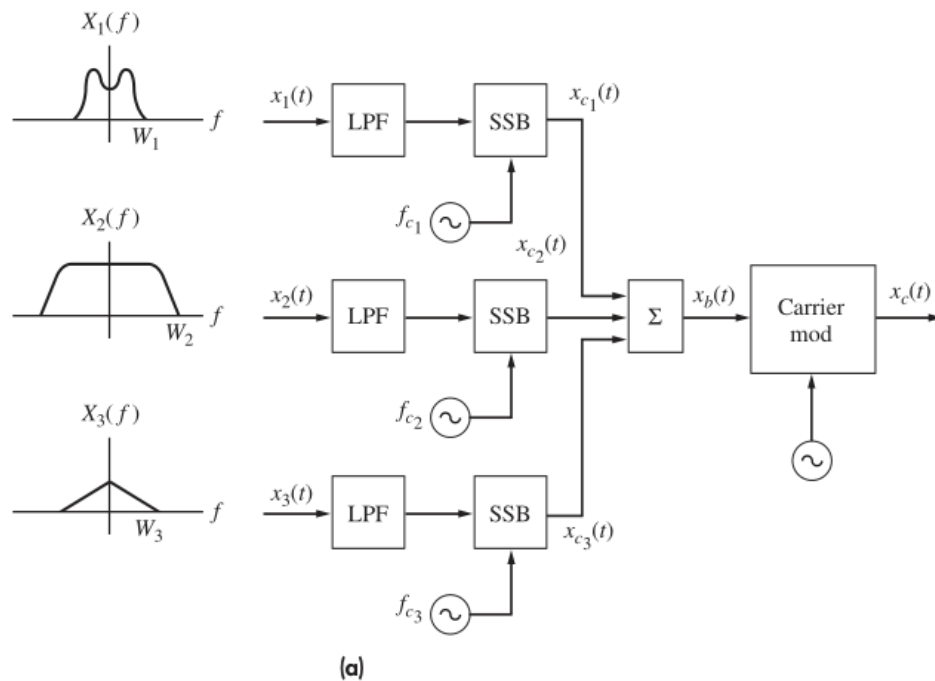
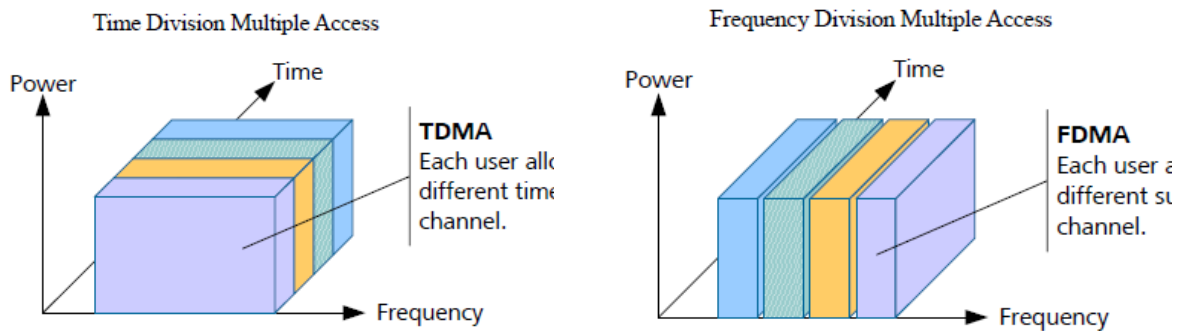
**Probabilidade de overflow** em função do buffer (em UD)



Comprimento do buffer para cada uma das entradas

## FDM

- Vários canais no mesmo meio de transmissão em diferentes frequências (**portadoras**)
- Sinais devem ser mantidos separados para que não se sobreponham uns aos outros (**banda de guarda**). (slot no domínio da frequência)
- o principal problema prático do FDM é **crosstalk** (diafonia - google translate)
- Filtros **passa-banda** na recepção do sinal.



## Ficha 3

### exe 1 :

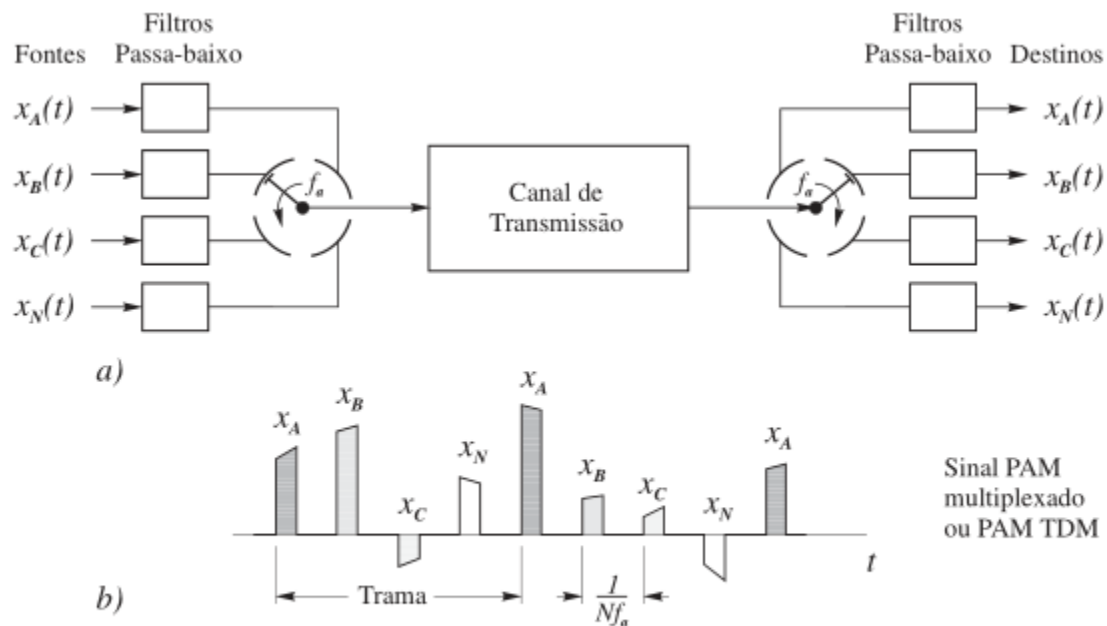


Figura 6.1: Multiplexagem por divisão do tempo. Sistema TDM

8 sinais TDM/PAM **síncrono**. Seis dos sinais têm uma largura de banda de 4 KHz e os restantes de 12 KHz.

$$\begin{array}{lll} x_A(t), x_B(t), x_C(t), x_D(t), x_E(t), x_F(t) \Rightarrow & B = 4\text{KHz} & \Rightarrow \mathbf{F_a = 8KHz} \\ x_G(t), x_H(t) \Rightarrow & B = 12\text{KHz} & \Rightarrow \mathbf{F_a = 24KHz} \end{array}$$

a)

$F_a = 24\text{KHz}$  (mínima para todos sinais)

$R_c = 8 \text{ canais} * 24\text{KHz} = 192\text{K}$  [amostras / seg] → **sai do MUX**

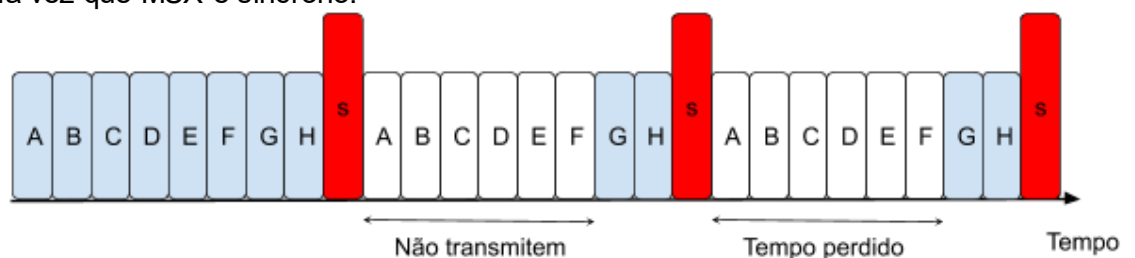
b)

$F_a = 24\text{KHz}$  (sinais  $x_G(t), x_H(t)$ )

**$F_a = 8\text{KHz}$**  (restos sinais)

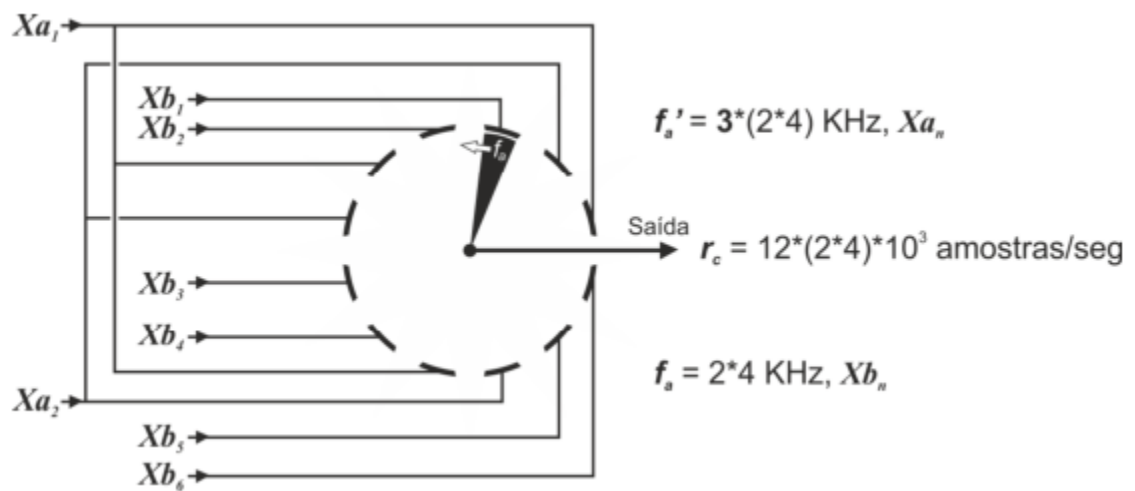
$R_c = 8 \text{ canais} * 24\text{KHz} = 192\text{K}$  [amostras / seg] → **Ritmo é mesmo**

Uma vez que MUX é síncrono!



Podemos pensar como : Um sinal com  $R_b \Rightarrow 24 \text{ KHz} = 3 * 8\text{KHz}$

$$R_c = (6 + 2*3) * 8\text{KHz} = 96\text{K} [\text{amostras/seg}]$$



## exe 2 :

$B = 8$  KHz  $\rightarrow$  ( banda sinal)

$F_a = 2 \cdot b = 16$  KHz

$N = 64 \rightarrow$  num canais

$$q = 1024 \Rightarrow \boxed{q = 2^k \quad k = \log_2 q} \Rightarrow k = 10 \text{ [dig. bin]}$$

sinad digitalizado

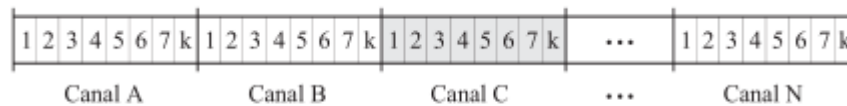


Figura 1 Exemplo de organização de trama TDM

$$R_c = N \cdot F_a \cdot k = 64 \text{ canal} \cdot 16 \text{ KHz} \cdot 10 \text{ bit} = 10240 \text{ Kbps} = 10,24 \text{ Mbps}$$

### exe 3 :

a)

Para multiplexar maior número de canais básicos (hierarquização), baseados em **Canal básico** = 64 Kbps -- *timeslot*

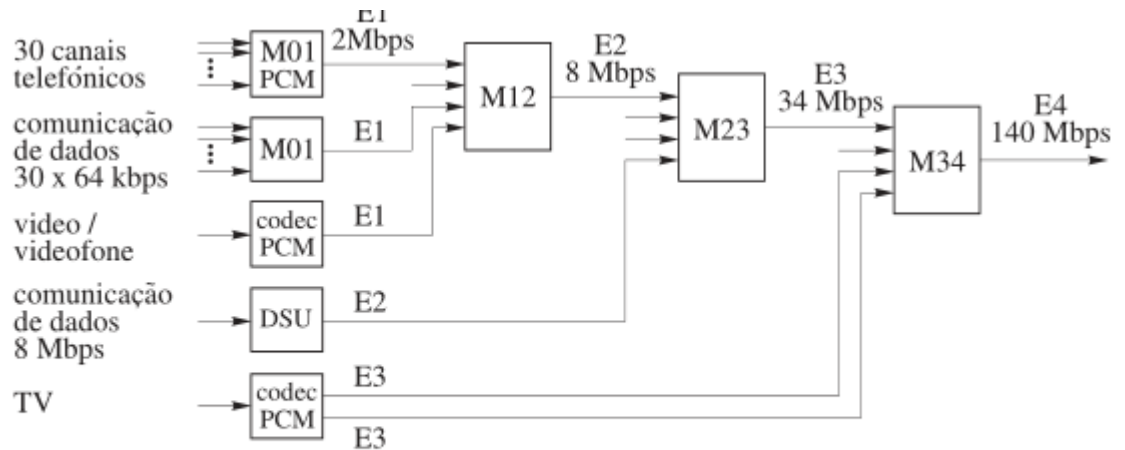


Figura 6.11: Exêmplo de uma multiplexagem PDH Europeia

**SDH/SONET** constituído por multiplexadores, repetidores e comutadores ligados entre si por fibra óptica.

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).



b)

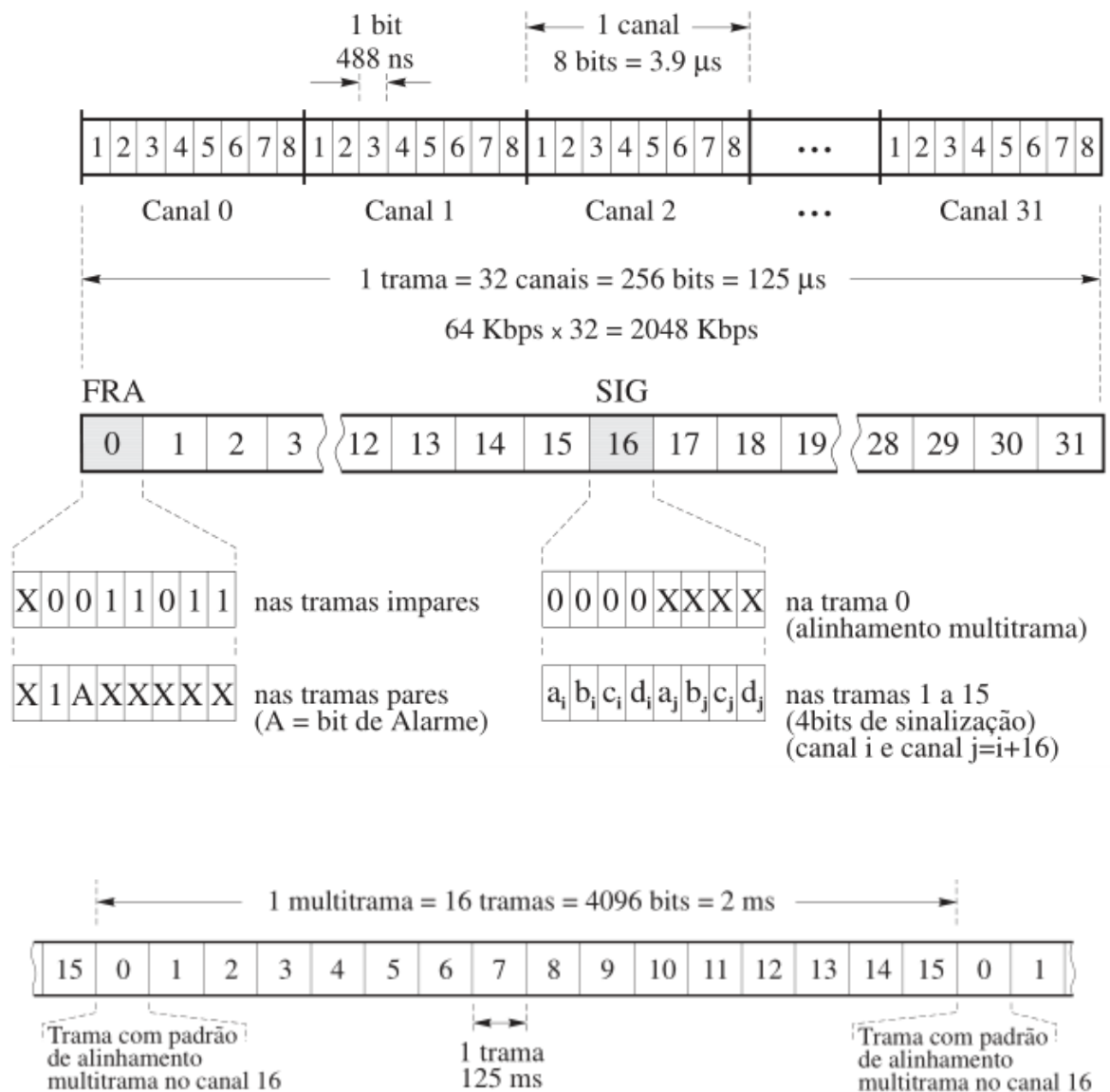


Figura 6.7: Multitrama PCM de 2 Mbps

Cada Canal dispõe 4 bit de sinalização em 16 tramas , i.e. intervalos de 2 ms, o que dá **ritmo de sinalização 2kbps**

c)

Multiplexagem feita por bytes entrelaçados .

90 bytes \* 8 bits/byte \* 9 rows/frame \* 8000 frames/sec and yields an SONET STS-1 signal rate of **51.840 Mbps**.

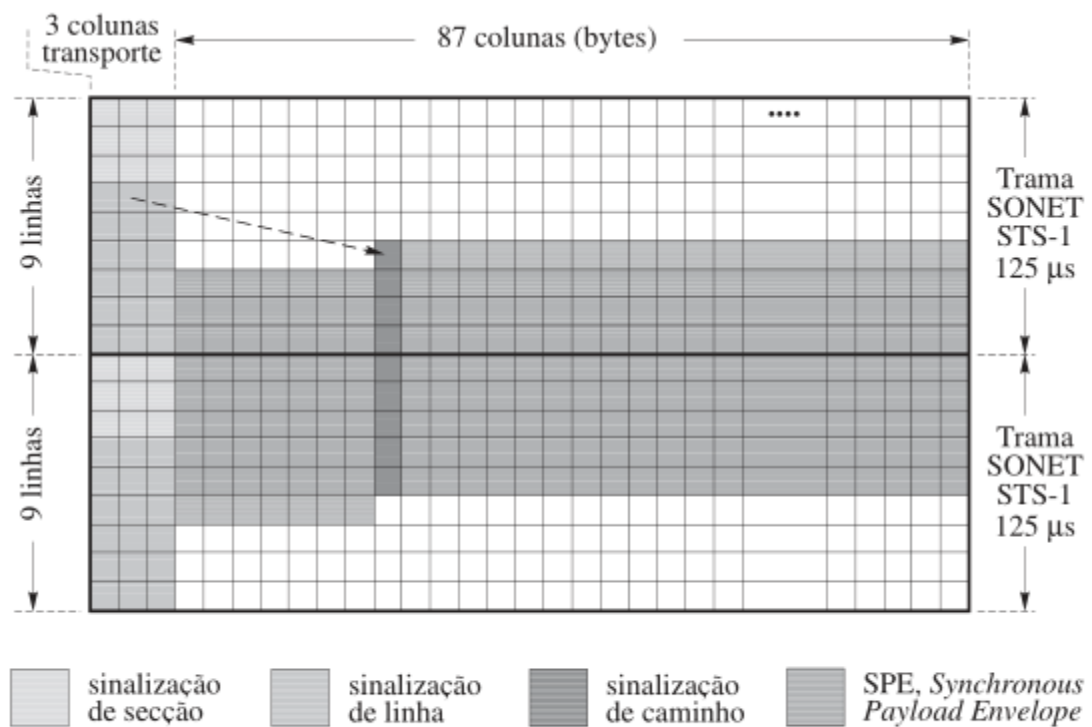


Figura 6.16: Duas tramas SONET STS-1 contíguas

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

exe 4 :

ver explicação: **TDM Assíncrono**

exe 5 :

- Vamos usar o exemplo **modelo M/D/1** para estudar os multiplexadores estatísticos
  - intervalos entre chegadas seguem uma exponencial negativa ...
  - tempos de serviço determinísticos (fixos) ...
  - 1 servidor ...
  - ... algum problema em assumir este modelo?

1

N = 60 sinais

K = 80 [bit] → comprimento msg (DU)

Rbs = 60 Bytes/sec → ritmo MUX , 60 \* 8 = 480 bit/sec

a)

$$S = K / Rbs$$

$$S = 80 / 480 = 0.17 \text{ [sec]} \rightarrow \text{tempo médio serviço por DU}$$

$$a = 30 * 1/15 + 30 * 1/30 = 3 \text{ [DU/sec]} \rightarrow \text{ritmo médio chegadas DU}$$

$$p = a * S = 3 * 0.17 = 0.51 \rightarrow \text{coeficiente utilização linha}$$

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

Tempo medio de atraso de uma DU

$$Tq = S + p*S / (2*(1-p)) = 0.17 + 0.51*0.17 / (2 * (1-0.51)) = \mathbf{0.25 \text{ [sec] V}}$$

b)

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

numero medio DU no MUX

$$N = 0.51 + 0.51^2 / 2*0.49 = 0.75 \text{ [DU] V}$$

c)

Se a linha de saída tivesse o dobro do ritmo de transmissão considerado, então os tempos de atraso das mensagens no multiplexador desceriam para metade?

$$Rbs = 480 * 2 = 960 \text{ [bit/sec]}$$

$$S = K / Rbs = 0.08 \text{ [sec]}$$

$$p = a * S = 3 * 0.08 = 0.24$$

$$Tq = S + p*S / (2*(1-p)) = 0.08 + 0.24*0.08 / (2 * (1-0.24)) = 0.092 \text{ [sec] F}$$

d)

Considerando que os terminais emitem mensagens com metade do comprimento mas com **taxa de emissão duplas** poderíamos afirmar que o número médio de mensagens no multiplexador seria o mesmo mas os atrasos médios das mensagens no multiplexador desceriam para metade?

$$K = 40 \text{ bit} = \text{DU}$$

$$a = 30 * 2/15 + 30 * 2/30 = 4 + 2 = 6 \text{ [DU/sec]}$$

$$S = K / R_{bs} = 40/480 = 0.083 \text{ [sec/DU]}$$

$$p = a * S = 6 * 0.083 = 0.5$$

$$T_q = S + p*S / (2*(1-p)) = 0.083 + 0.5*0.083 / (2 * (1-0.5)) = 0.1245 \text{ sec } \mathbf{V}$$

$$N = 0.5 + 0.5^2 / 2*0.5 = 0.75 \text{ DU} \quad \mathbf{V}$$

### exe 6

$$K = 200 \text{ [bit]} \rightarrow \text{comprimento msg (DU)}$$

$$R_{bs} = 1 \text{ Mbit/sec} \rightarrow \text{ritmo saída MUX}$$

$$5 / 2 = 2.5 \text{ [DU/sec]} \Rightarrow N_1 = \mathbf{500 \text{ sinais}}$$

$$2/1 = 2 \text{ [DU/sec]} \Rightarrow N = \mathbf{? \text{ sinais}}$$

a)

$$p = a * S \leq 0.7 \rightarrow \text{coeficiente utilização linha}$$

$$S = K / R_{bs}$$

$$S = 200 / 1\text{M} = 0.2 \text{ millisec} \rightarrow \text{tempo médio serviço por DU}$$

$$a = 500 * 2.5 + N * 2 = 1250 + 2N \text{ [DU/sec]} \rightarrow \text{ritmo médio chegadas DU}$$

$$p = a * S \Rightarrow (1250 + 2N) * 0.2 * 10^{-3} \leq 0.7$$

$$N \leq 1125$$

b)

Considerando um nível de utilização do multiplexador de 70%, indique:

- i. O atraso médio das **mensagens no multiplexador**.
- ii. O número médio de mensagens **em fila de espera**.
- iii. Que comprimento deve ter o buffer (em bits) para que não se perca mais do que uma em cada 1000 mensagens.

i)

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

$\rho = a * S = 0.7 \rightarrow$  coeficiente utilização linha  
 $S = K / R_{bs}$   
 $S = 200 / 1M = 0.2 \text{ mseg} \rightarrow$  tempo médio serviço por DU  
 **$T_q = 0.43 \text{ mseg}$**

ii)

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

**$N_q = 0.82 \text{ DU} \rightarrow$  número médio de mensagens em fila de espera.**

iii)

$1/1000 = 10^{-3} \Rightarrow$  ver o gráfico da **Probabilidade de overflow** em função do buffer (em UD)  $\Rightarrow 10 \text{ DU}$  comprimento deve ter o buffer  $\Rightarrow 10 * 200 = 2 \text{ Kbits}$

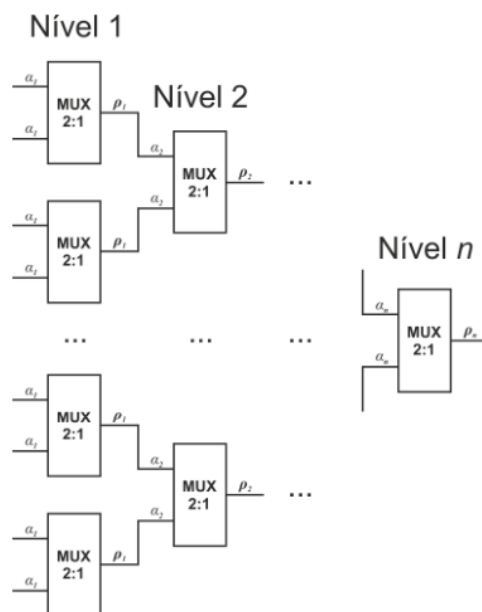
### exe 7

**multiplexadores têm duas linhas de entrada.**

**multiplexadores de primeira ordem têm uma ocupação média de 1%**

**multiplexador de maior ordem deve ter uma utilização média da linha de saída inferior a 33%.**

“Podemos deduzir que, no máximo, teremos cinco níveis de multiplexagem e a ocupação média da linha de saída do último multiplexador é de 32%.”



Temos então que encontrar o valor de **n** que satisfaça  $p < 33 \%$ ,

ou seja,  $2^n < 33$  i.e.,  $n < \log_2 33 = 5.04$ .

O menor valor inteiro que satisfaz a inequação é  **$n = 5$**  e  **$p_s = 32\%$** , pelo que a afirmação é **verdadeira**.

### exe 8

Um multiplexador estatístico possui 10 linhas de entrada a 2 Mbps apresentando um tráfego intermitente que se traduz numa ocupação média de cada linha de 7%. O multiplexador pode ser programado para reservar espaço em buffer até 4.25 KBytes.

N = 10 linhas

Rbe = 2Mbps → Ritmo entrada cada linha

a = 7 % tempo de funcionamento

Tb = 4.25 KBytes = 34 Kbit ⇒ tamanho do Buffer

a) Qual deve ser o débito mínimo da linha de saída para que a perda de pacotes no multiplexador, para pacotes de 1400 bits, não exceda um em cem milhões?

K = 1400 bits

perdas < 10<sup>-8</sup>

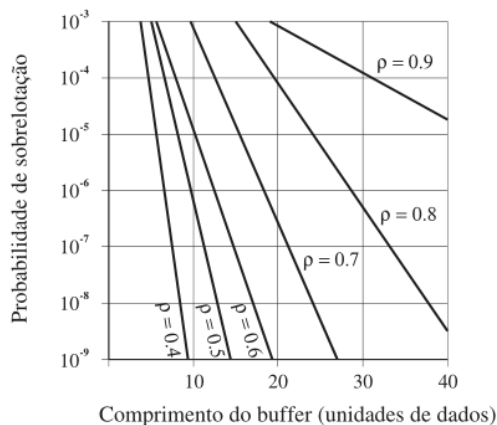
**Rbs = ?**

$$\lambda = N \alpha \frac{r_{be}}{k}$$

Ritmo medio chegadas

**λ = 1000 [DU/sec]**

**Tb\_DU = Tb/K = 25 [DU]** - tamanho buffer



**p = 70 %** - pelo grafico

$$\rho = \lambda \bar{S} \Rightarrow \mathbf{S = 0.70 * 10^{(-3)}} \text{ - tempo de serviço por DU}$$

$$\bar{S} = \frac{k}{r_{bs}} \Rightarrow \mathbf{Rbs = 2 Mbps}$$

- ritmo de saida MUX

b) Qual o tempo médio de atraso de um pacote no multiplexador nestas condições?  
Que proporção desse tempo é de espera no buffer e de transmissão?

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

p = 0.7

S = 0.7 millisec -- temp trans

Tq = 1.52 millisec → **tempo médio de atraso de um pacote no MUX**

1.52 - 0.7 = 0.82 millisec → **tempo espera no buffer**

c)

Para o mesmo cenário descrito qual deveria ser a capacidade mínima da linha de saída se fosse utilizado um multiplexador síncrono e qual seria a sua utilização?

$R_s = N * R_e$ : N - numero de fontes,  
 $R_s = 20\text{Mbps}$

utilização da linha seria 10 vezes menor, ou seja, 7% (nos multiplexadores TDM síncronos em que as linhas de entrada são todas iguais, a utilização da linha de saída é igual à ocupação média de qualquer uma das linhas de entrada).

### exe 9

