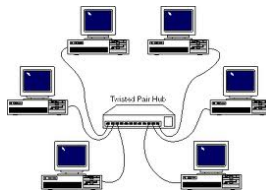






### III. MULTIPLEXAGEM

- Quando um canal possui **uma capacidade muito superior ao débito de uma fonte**, pode utilizar-se o canal para transportar os sinais de várias fontes, ou seja **multiplexar** o canal



1



### III. MULTIPLEXAGEM

- Quando um canal possui **uma capacidade muito superior ao débito de uma fonte**, pode utilizar-se o canal para transportar os sinais de várias fontes, ou seja **multiplexar** o canal
- Como?** Várias técnicas, neste capítulo são referidas duas das principais:
  - multiplexagem **por divisão de tempo (TDM)**
  - multiplexagem **por divisão de frequência (FDM)**
  - soluções híbridas (e.g. TDM + FDM)
  - muitas variantes de TDM e FDM
  - ... e outras técnicas

2



### III. MULTIPLEXAGEM

#### **FDM** (*Multiplexagem por Divisão de Frequências*)

- Técnica em que cada fonte ocupa uma **fracção da largura de banda** disponível durante **todo o tempo**
- Método mais antigo
- Método que surgiu inicialmente associado à transmissão analógica
- Exemplo:
  - transmissão e sintonização de estações de rádio; espaço livre constitui o meio comum de transmissão que é multiplexado em frequência



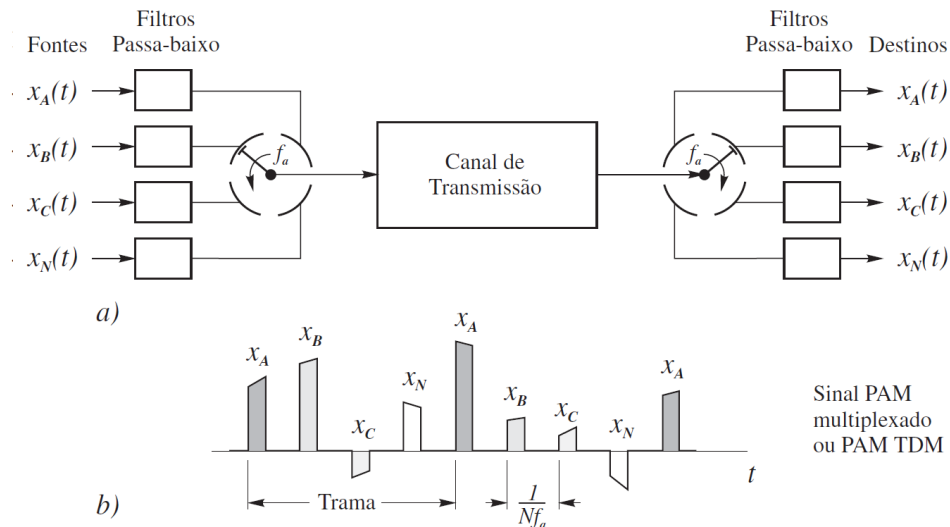
### III. MULTIPLEXAGEM

#### **TDM** (*Multiplexagem por Divisão de Tempo*)

- Cada fonte ocupa **toda a largura de banda** disponível durante **parte do tempo**
- Ganhou relevância com a crescente **digitalização** das comunicações (porquê?)
- Mais apropriado para transmissões digitais
- Diferentes tipos de TDM
  - com diferentes características e aplicações
  - a ver mais tarde....

### III. MULTIPLEXAGEM

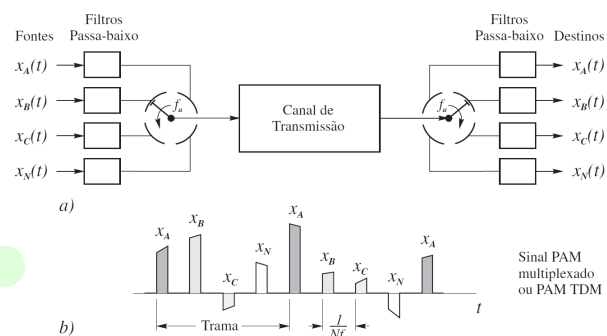
#### TDM - Exemplo de Multiplexagem por Divisão de Tempo



5

### III. MULTIPLEXAGEM

- Se neste exemplo todas as fontes produzirem sinais com a mesma largura de banda (B) comutador deverá rodar ao ritmo  $f_a \geq 2B$



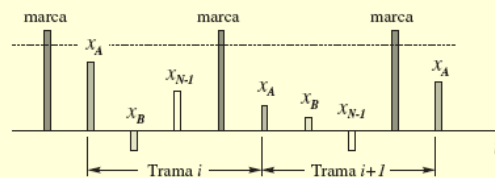
- Neste exemplo uma **trama** será um conjunto, ordenado no tempo, com uma amostra de cada entrada *paralelos do fonte | destino*
- Ritmo de pulsos PAM no canal será de  $r_c = N \cdot f_a \geq N \cdot 2 \cdot B$  *frequência*
- [se fosse considerado o processo digitalização completo] no canal estariam os **bits** representativos de cada uma das amostras *largura de banda*

6

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM

- **Noção de sincronização**
  - No exemplo anterior, corresponde à necessidade de cada amostra ser entregue ao destino correcto no instante devido
  - **Necessidade da existência de marcas** entre cada grupo de amostras ou tramas
  - No contexto do exemplo anterior:

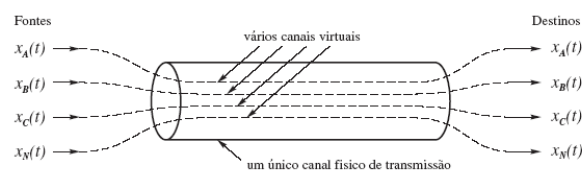


7

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM

- **Noção de Canal Virtual (ou lógico)**
  - O canal de transmissão é visto como a agregação de vários **canais virtuais**
  - cada canal virtual é um par emissor-receptor
  - No contexto do exemplo anterior:



8



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM

Exemplo antes apresentado: os símbolos são contíguos no tempo; ocorrem sem interrupção; se fonte deixa de transmitir os intervalos de tempo que lhe estão atribuídos tem de decorrer porque ....



##### 1. TDM Síncrono

Assume a **ordenação temporal** e **continuidade dos canais** (i.e. cada canal tem um “espaço” próprio reservado para transmitir os seus dados)

9



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM

##### 2. TDM Assíncrono

- Quando não se exige ordenação nem continuidade
- Em muitos cenários melhor desempenho devido ao **aproveitamento do tempo desperdiçado por alguns canais**
- Multiplexadores estatísticos seguem esta filosofia
- Processo também designado por **Multiplexagem Estatística**



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Alguns Fundamentos TDM SÍNCRONO

- Como se estruturam as tramas?  
[ a) organização das tramas]
- Como se deteta o início de uma trama?  
[ b) alinhamento de tramas]
- Como se integra informação de controlo nas tramas?  
[ c) sinalização]
- Exemplos concretos?  
[e.g. d) hierarquias de multiplexagem PDH e SONET]

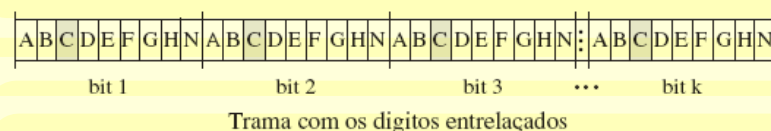
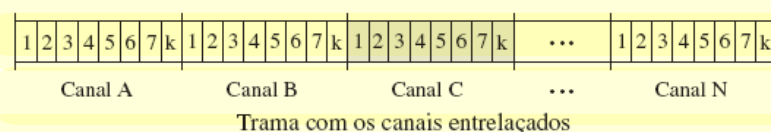
11



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Alguns Fundamentos TDM SÍNCRONO

- **Organização das tramas** que multiplexam diversos canais binários após digitalização das fontes
- Trama multiplexa **N canais** básicos de K bits
- trama organizada em: **canais entrelaçados** ou **dígitos entrelaçados**



12



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Alguns Fundamentos TDM SÍNCRONO

##### ALINHAMENTO DAS TRAMAS

- Necessidade de detecção do início da trama - **alinhamento da trama**
- Utilização de um **determinado padrão de vários bits** transportados pela trama
- Quando o receptor perde o alinhamento de trama:
  - **procura esse padrão** de bits de modo a **realinhar** num curto intervalo de tempo
  - diz-se que o receptor está em *modo caça*

13



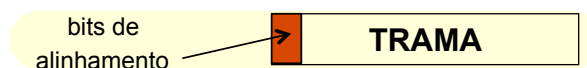
### III. MULTIPLEXAGEM

#### Alguns Fundamentos TDM SÍNCRONO

##### ALINHAMENTO DAS TRAMAS

##### PADRÃO AGRUPADO

Os bits de alinhamento formam um **conjunto consecutivo** no início da trama



##### PADRÃO DISTRIBUÍDO

Os bits de alinhamento são **espalhados** pela trama e ao longo de várias tramas



14





### III. MULTIPLEXAGEM

#### Alguns Fundamentos TDM SÍNCRONO

##### SINALIZAÇÃO

- Consiste na transmissão de **informação auxiliar** entre os equipamentos de multiplexagem para efeitos de controlo ou informação auxiliar dos próprios canais
- Informação de sinalização possui semântica própria (comandos, confirmações etc.)  
(ao contrário da informação transportada entre as fontes e destinos que é transferida de forma transparente)

15



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Alguns Fundamentos TDM SÍNCRONO

##### SINALIZAÇÃO - exemplos

- **IN-BAND**  
Dentro do Octeto – bit menos significativo do octeto é usado (a cada X octetos) para sinalização; utilização problemática para a transmissão de dados no canal
- **OUT-BAND**  
Fora do Octeto – a cada canal de informação estão atribuídos um ou mais dígitos de sinalização, num canal separado, mediante regras de atribuição pré-estabelecidas
- **CANAL COMUM**  
Reservado um canal por trama para sinalização o qual é atribuído ocasionalmente de acordo com as necessidades a um ou outro canal (uso de etiquetas para identificação do canal a que dizem respeito).

16



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM SÍNCRONO

primeiros sistemas de multiplexagem... consequência da digitalização!

- **Sistemas de Multiplexagem PCM**

Primeira forma de TDM apareceu com a **digitalização** PCM do sistema telefónico com a preocupação de transmissão de voz

- **Outras estruturas de Multiplexagem SDH, SONET**

Sistemas de multiplexagem melhor adaptados à transmissão de sinais de informação multimédia modernos, contemplar tecnologia óptica, visam obtenção de débitos mais elevados, permitir melhor operação e manutenção dos sistemas de multiplexagem

17



### III. MULTIPLEXAGEM

#### **Sistemas de Multiplexagem PCM**

- Necessidade de uniformizar os diversos parâmetros (ritmo, canais, sinalização, etc...) levou à **normalização da multiplexagem PCM**
- Normas Americanas e Europeias especificadas em recomendações da ITU (International Telecommunications Union)
  - » Trama PCM primária de 2 Mbps (sistema Europeu)
  - » Trama PCM primária de 1.5 Mbps (sistema Americano)
  - » Hierarquias de Multiplexagem ....

18



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Exemplo - Trama PCM Primária de 2 Mbps

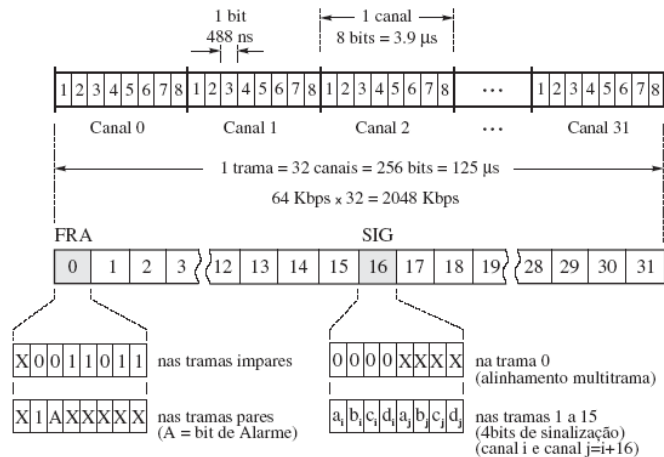


Figura 6.6: Estrutura da trama de multiplexagem PCM de 2 Mbps

19



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Exemplo - Trama PCM Primária de 1.5 Mbps

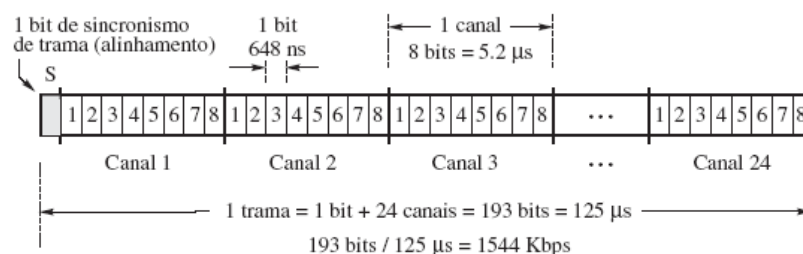


Figura 6.9: Estrutura da trama de multiplexagem PCM de 1.5 Mbps

20



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Hierarquia de Multiplexagem PDH

- Para multiplexar um maior número de canais básicos do que aquele que o sistema primário admite recorre-se à **hierarquização de multiplexadores** (cascata de multiplexadores)
- As saídas dos multiplexadores de primeira ordem são multiplexadas em multiplexadores de segunda ordem, e assim sucessivamente ....
- Estes procedimentos de **hierarquias de multiplexagem** são normalizados, e.g. **hierarquia PDH**

21



### III. MULTIPLEXAGEM

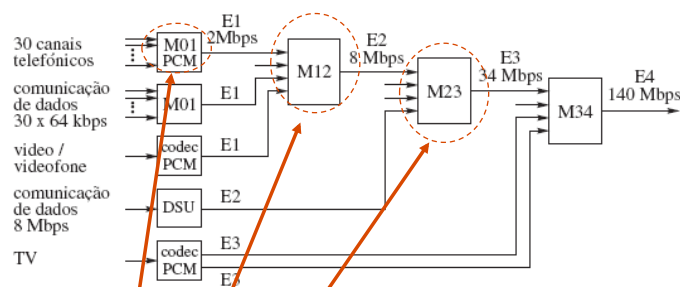


Figura 6.11: Exemplo de uma multiplexagem PDH Europeia

Tabela 6.1: Hierarquias de Multiplexagem 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			

ordem dos  
multiplexadores

22



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Outras Hierarquias de Multiplexagem - SDH, SONET

- Motivadas pela necessidade de repensar e melhorar as normalizações TDM anteriores
- Motivadas pela evolução e crescente disponibilidade da tecnologia óptica
- Objectivo da continuação da hierarquia até e para além do gigabit por segundo (Gbps)
- Necessidade de enriquecer a estrutura de sinalização para melhorar serviços de administração

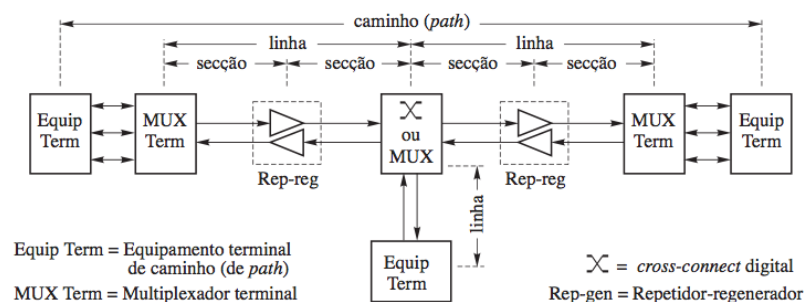
23



### III. MULTIPLEXAGEM

#### SDH, SONET

- Sistema SDH/SONET constituído por multiplexadores, repetidores/regeneradores, comutadores...



- e.g. Fibra óptica ininterrupta que interliga quaisquer dos dispositivos designada por secção; trajecto entre dois mux. (com ou sem repetidores) designado por linha; trajecto entre equipamentos terminais designado por caminho/path

24



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Exemplo de Trama Básica SONET

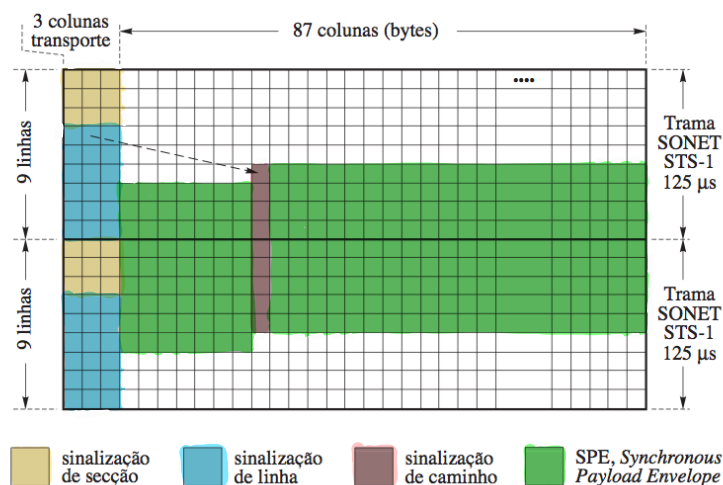
- Tramas constituídas por blocos de 810 bytes
- Duração 125 microseg. (coincide com o período de amostragem PCM)...
- 8000 tramas por segundo
- Tramas podem vistas como uma matriz de bytes (90 colunas, 9 linhas)
- $90 * 9 = 810 \text{ bytes} * 8000 = 51.84 \text{ Mbps}$  ritmo do **canal básico SONET** cuja **trama** é designada por **STS-1**
- Todos os restantes ritmos SONET são múltiplos do STS-1

25



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Exemplo de Trama Básica SONET (STS-1)



26



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Hierarquias de Multiplexagem SDH/SONET

- SONET: Sinal *STS-i* transmitido sob forma óptica designado por *OC-i*; SDH: Só aplicado ao contexto de sinais ópticos

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

etc.....       etc.....       etc.....       .....

Nota:

- só alguns dos níveis identificados na tabela é que são mais frequentemente usados

- existem mais níveis, exemplo: OC-768 com débito de aprox. 40 Gbps

27



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Exemplo de um cenário de multiplexagem SDH

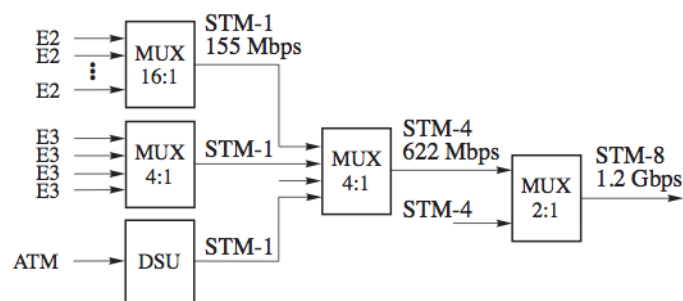


Figura 6.17: Multiplexagem hierárquica SDH

28

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO

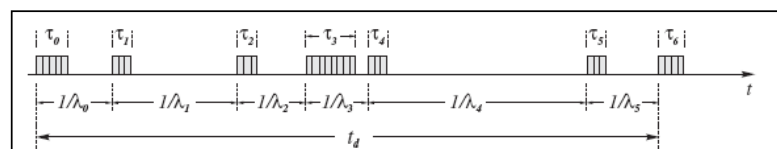
- Multiplexagem síncrona mais apropriada para transmissão digitalizada de fontes que produzem informação a um **ritmo constante**, sem interrupções
- Existem cenários em que tal não é usual
- Tráfego produzido pelas aplicações computacionais é muitas vezes de **natureza aleatória** (tráfego Internet?)
- Outros tipos de multiplexagem mais apropriadas?

29

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO

- Exemplo de tráfego de natureza aleatória



o valor médio de  $\lambda_i$  é o número médio de DUs produzidas por segundo

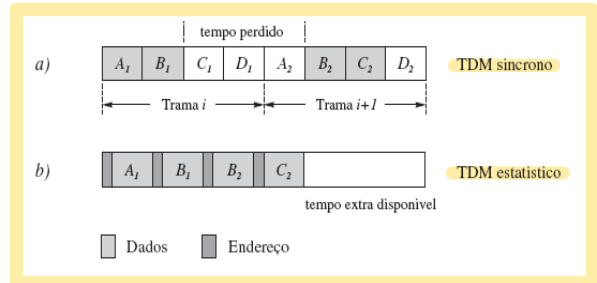
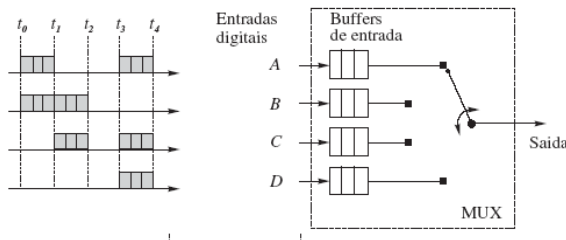
- Será pois mais vantajoso, nestes casos, a **alocação dinâmica** de ranhuras temporais dependendo se as fontes tem ou não tráfego para enviar

30



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO vs TDM Síncrono



- **TDM estatístico** - nem todos os equipamentos estão a transmitir ao mesmo tempo -> **ritmo de saída pode ser inferior à soma dos ritmos das entradas**

31

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO

- Situações de **pico de tráfego**?
  - tráfego de entrada excede capacidade de saída logo necessidade de **buffers (filas de espera)**
  - **filas grandes = atrasos grandes** e **filas pequenas = perdas** (*consequências para diferentes tipos de tráfego?*)
  - ritmo de saída importante para o desempenho do sistema
  - necessidade de estudar comportamento do TDM estatístico com modelos matemáticos
  - **modelos de filas de espera**

32



### III. MULTIPLEXAGEM

#### MODELAÇÃO DE TRÁFEGO

Considerando um determinado tamanho (K) para a fila de espera é usual a usar sintaxe  $A/B/m/K$ , pode ser ainda referida a população e a disciplina da fila (por defeito FIFO)

- Modelo de Filas de Espera é identificado pela notação (simplificada)  $A/B/m$ 
  - $A$  - distribuição dos tempos entre chegadas
  - $B$  - distribuição dos tempos de serviço
  - $m$  - número de servidores
- 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?

33

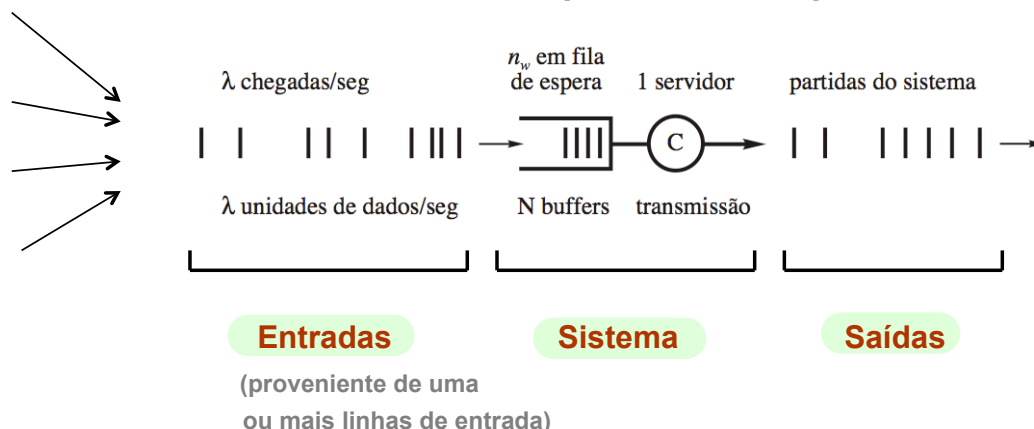


### III. MULTIPLEXAGEM

#### MODELAÇÃO DE TRÁFEGO EM MULTIPLEXADORES ESTATÍSTICOS

exemplo de cenários de redes de comunicações onde este tipo de modelação poderá ser útil?

##### Modelação por Filas de Espera



34



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – MODELO M/D/1

- **Ritmo Médio de Chegadas,  $\lambda$**   
Número médio de mensagens/tramas/pacotes que chegam ao multiplexador por segundo
- Um multiplexador com  **$N$**  linhas de entrada; cada uma com um ritmo binário de entrada  **$r_{be}$** ; tamanho das mensagens (ou DUs)  **$K$** ; factor de utilização das linhas (i.e. ocupação média entre 0 (0%) e 1 (100%))  **$\alpha$**  então:

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

- Se linhas de entrada com ritmos e  **$\alpha$**  diferentes:

$$\lambda = [\alpha_1 r_{be1} + \alpha_2 r_{be2} + \dots + \alpha_N r_{beN}] / K$$

35



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – MODELO M/D/1

- **Tempo médio de Serviço,  $\bar{S}$**   
Tamanho das mensagens (ou DUs - Data units),  **$K$  bits**  
Ritmo de Saída em bps,  **$R_{bs}$**

$k$  e  $r_{bs}$  expressos em unidades coerentes, ex: bits e bps ou outras

$$\bar{S} = \frac{k}{r_{bs}} \text{ seg por DU}$$

- **Utilização do Servidor,  $\rho$**

$$\rho = \lambda \bar{S}$$

se  $\rho < 1$  então sistema em equilíbrio

e caso contrário?

↳ Se  $\rho > 1$  então não consegue se despachar e a fila =  $\infty$ , perda de pacotes permanente



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – MODELO M/D/1

- Tempo médio de atraso de uma DU no multiplexador

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

em fila  $\rightarrow \bar{t}_w$

- Número médio de DUs no multiplexador

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

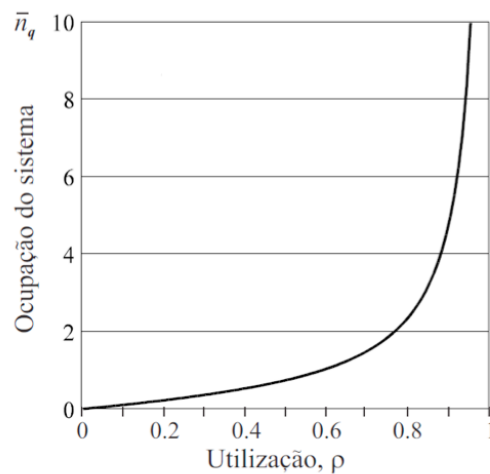
em fila  $\rightarrow \bar{n}_w$

37



### III. MULTIPLEXAGEM

#### MODELO M/D/1 - Exemplo de Resultados

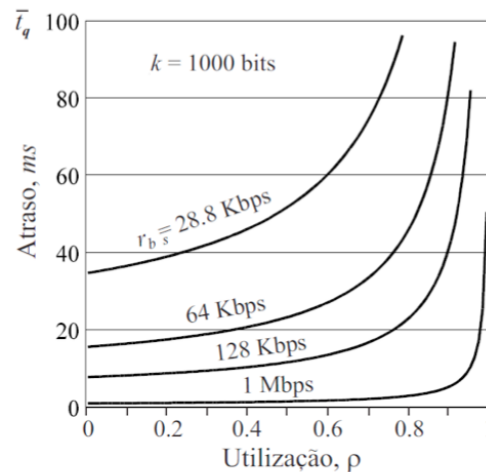


38



### III. MULTIPLEXAGEM

#### MODELO M/D/1 - Exemplo de Resultados



39



### III. MULTIPLEXAGEM

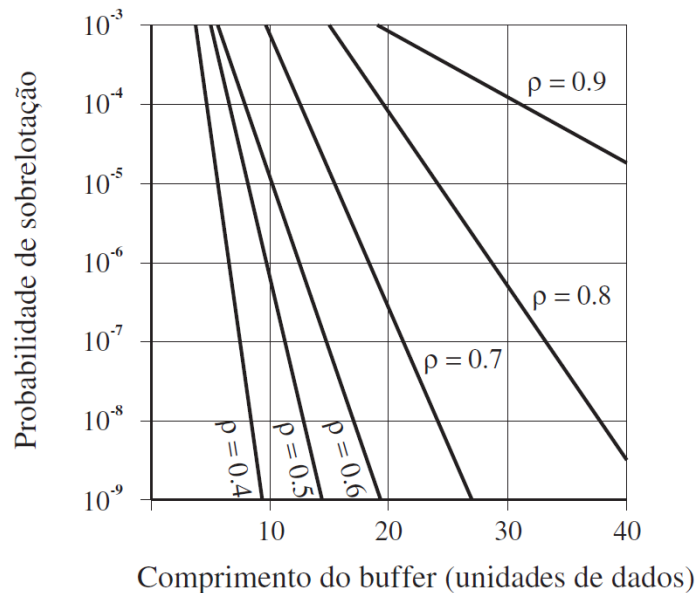
- Com as formulas apresentadas anteriormente é possível obter **valores médios** para a ocupação dos *buffers*
- No entanto durante a operação do multiplexador os valores de ocupação podem exceder bastante a média
- Como obter valores para as **probabilidades de sobrelotação** para um **determinado tamanho de buffer**?

[exemplos/aplicações práticas disto]

40

### III. MULTIPLEXAGEM

#### MODELO M/D/1 - Probabilidade de Sobrelotação



41

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

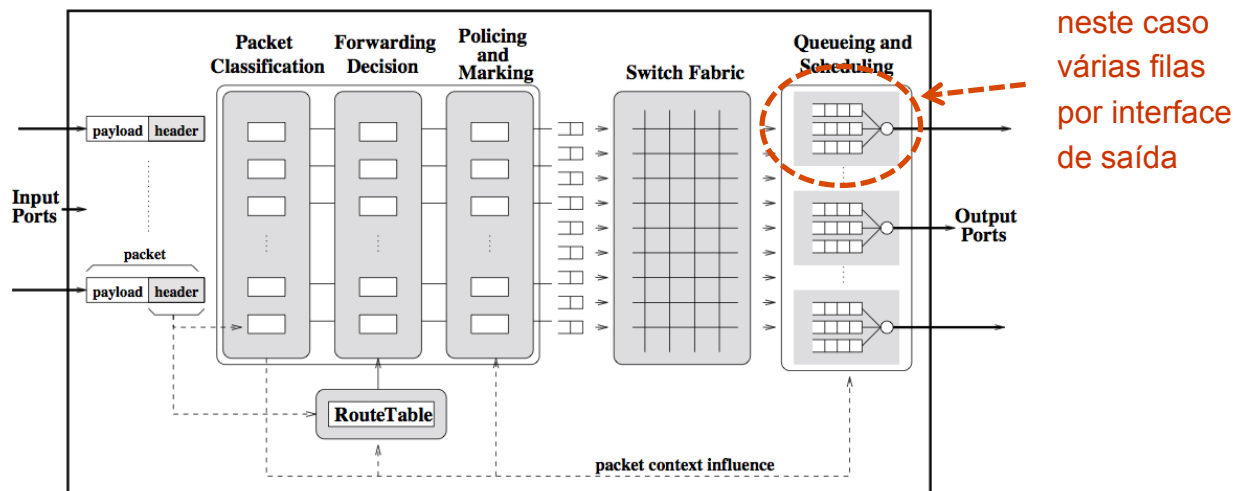
- A base teórica dos modelos de filas de espera é importante para o estudo/implementação de **diversos equipamentos de rede**
- e.g. **Routers** – equipamento de interligação de redes
  - os mecanismos de gestão de **filas de espera** e estratégias **escalonamento de pacotes** são essenciais para o tratamento dos pacotes ....
  - ... afectam a forma/**qualidade** como o **tráfego** é transmitido na rede

42

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

Exemplo (conceptual) de uma arquitetura de um router



### III. MULTIPLEXAGEM

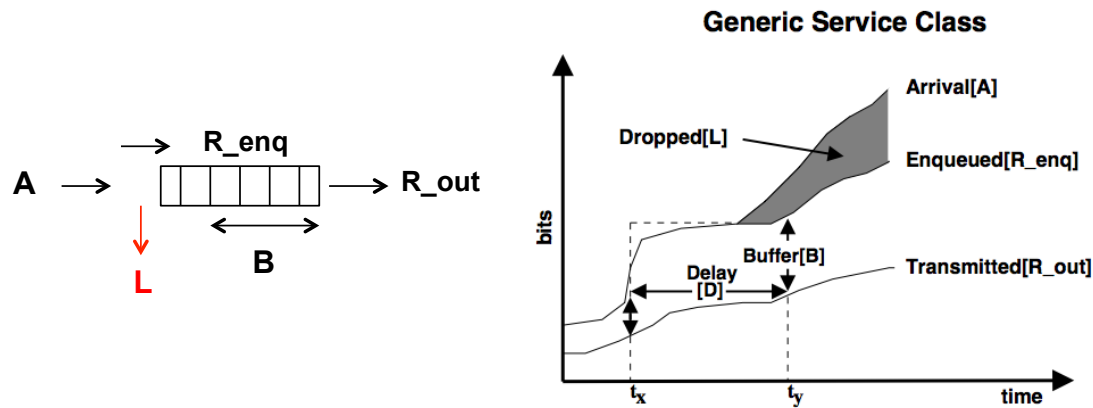
#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

- Estratégias de **escalonamento** e **gestão de filas** afectam as diferentes **classes de tráfego** (se existirem)
  - **débitos obtidos, perdas, atrasos, ...**
- Relação com a **Qualidade de Serviço (QoS)** obtida pelas aplicações Internet
- Existem inúmeras alternativas de estratégias de **escalonamento de tráfego** e **gestão de filas de espera**

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

Exemplo do comportamento de uma determinada *classe de tráfego*



45

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

Para conseguir algum tipo de **diferenciação de tráfego** pode ser necessária a utilização:

- estratégias de **gestão de filas espera**
- mecanismos de **escalonamento**

Exemplos/**gestão das filas de espera (buffers)**

- todos os pacotes partilham uma **única fila de espera**
- pacotes de diferentes classes são armazenados em **diferentes filas de espera**

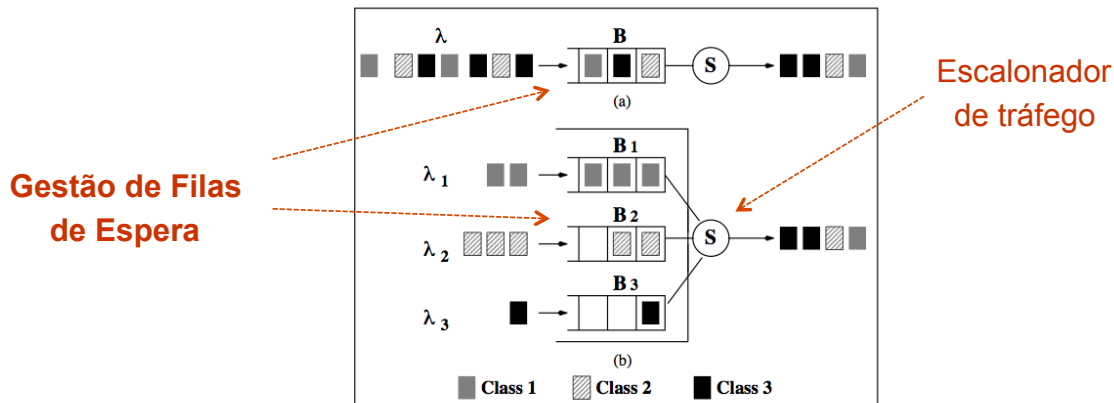
46



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

**Gestão de filas:** fila única versus várias filas de espera (vantagens/desvantagens ?)



47

### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

**Gestão de filas:** como lidar com insuficiência de recursos (i.e. perdas)?

- **drop tail:** fila cheia  $\rightarrow$  pacotes são perdidos
- **push-out:** possibilidade de retirar pacotes que estão em fila  $\rightarrow$  para entrarem outros
- ...
- **outras** abordagens ... RED (Random Early Detection) possibilidade de eliminação de pacotes mesmo com fila não cheia

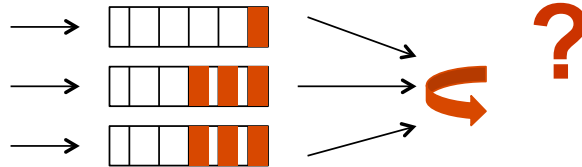
48



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

##### Estratégias de escalonamento de pacotes



Classificação:

- **work conserving**: escalonador só não transmite pacotes no caso das filas estarem vazias
- **non-work-conserving**: em alguns casos o escalonador pode não transmitir mesmo tendo pacotes em fila

49



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

##### Estratégias de escalonamento de pacotes

3 exemplo de mecanismos:

- **strict priority**: filas/classes com prioridades mais altas tem sempre prioridade sobre os outros pacotes (consequência?)
- **round robin**: e.g. em cada ciclo transmitir um pacote de cada fila/classe
- **weight fair queuing, weighted round robin, ...**: definição de “pesos” para cada uma das classes/filas → filas/classes são servidas de acordo com esses valores → forma de alocar diferentes débitos de saída a cada uma das classes/filas

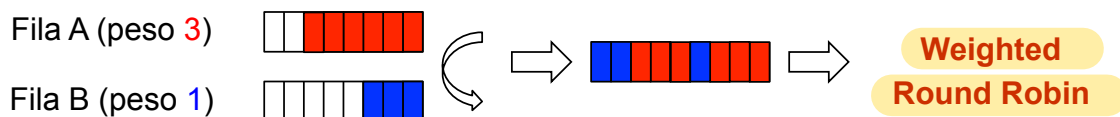
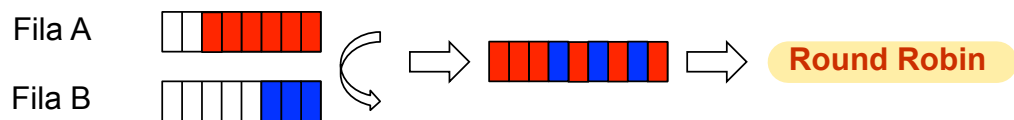
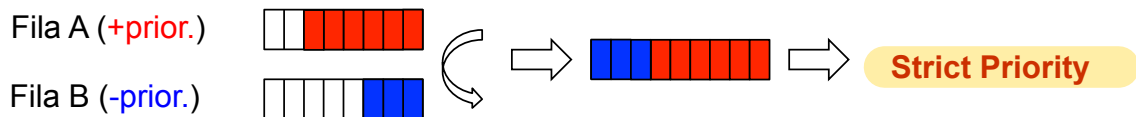
50



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Estratégias de escalonamento

[objectivos/consequências/problemas para o tráfego e rede?]



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Estratégias de escalonamento

#### Alguns exemplo de utilização

##### Exemplo #1

e.g. garantir **atraso mínimo** a uma determinada classe de tráfego [tráfego de voz, tempo de tempo real, etc.]

##### Exemplo #2

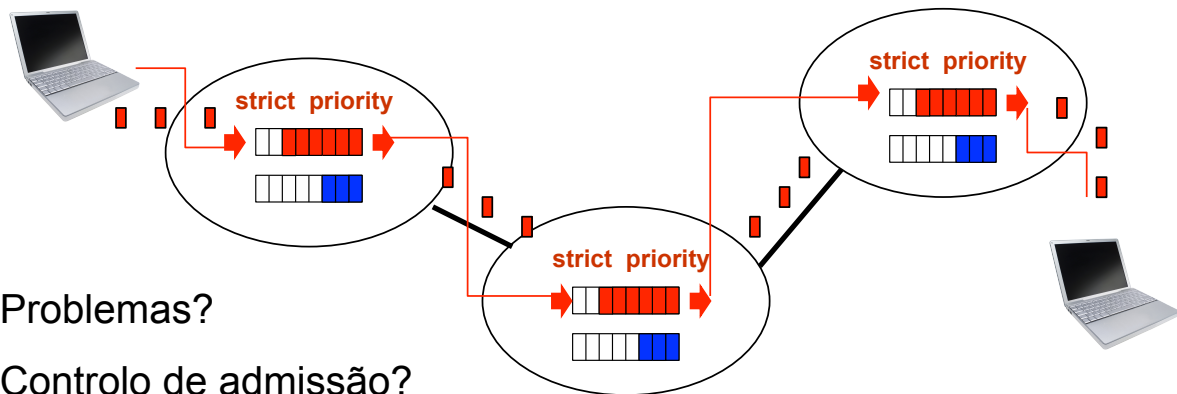
e.g. garantir a uma determinada classe/fila uma **% de débito** no link de saída



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Estratégias de escalonamento

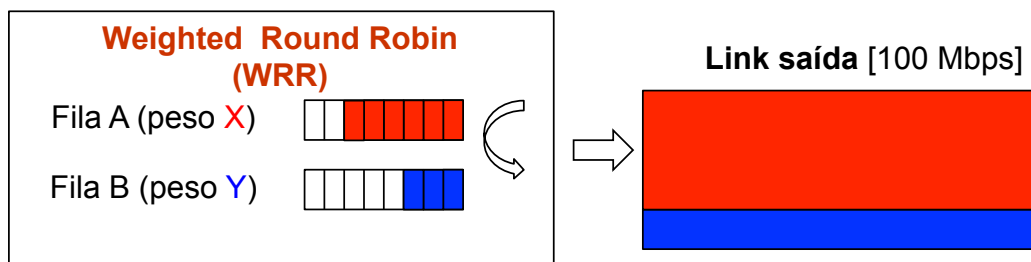
**Exemplo de cenários #1** e.g. garantir atraso mínimo a uma determinada classe (tráfego de voz, tempo real, etc.)...



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Estratégias de escalonamento

**Exemplo de cenários #2** e.g. garantir uma determinada % de débito no link de saída a uma classe/fila



Relação entre  $X, Y$  e débito obtido...

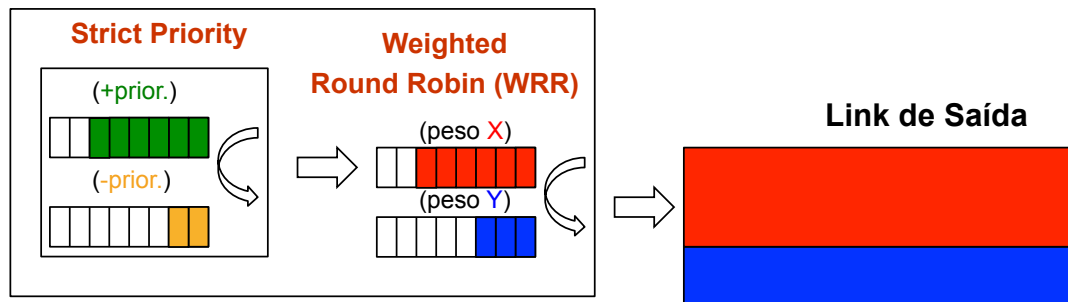
Tamanho pacote variável.... um problema?



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Estratégias de escalonamento combinadas/híbridas

Possibilidade de combinar diferentes estratégias



e.g. WRR trabalha com **duas classes** de tráfego e garante uma determinada distribuição do débito; **uma das classes é composta por 2 subclasses** [em que uma tem prioridade absoluta sobre a outra]



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

#### Outras Estratégias de escalonamento de pacotes

##### *Diferenciação Relativa/Proporcional de tráfego*

- **não são dadas “garantias”** a nenhuma classe/fila....
- ... mas garante-se que as **filas mais prioritárias vão ter melhor qualidade** que as filas menos prioritárias
- e.g. **atrasos/perdas das classes mais prioritárias** vão ser “n” **vezes melhores** que as sentidas pelas classes menos prioritárias...

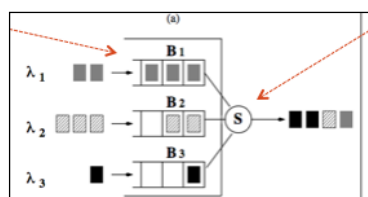
### III. MULTIPLEXAGEM

- **Exemplo ilustrativo de diferenciação relativa de tráfego:**
  - Gestão de  $n$  filas dinâmicas + Escalonamento pacotes aplicando **modelos de proporcionalidade** ...
  - Cada classe de tráfego tem associados **2 parâmetros**:
    - **parâmetro  $U_i$**  > vai influenciar a forma como os pacotes da classe/fila são selecionados para transmissão (**atrasos**)
    - **parâmetro  $L_i$**  > vai influenciar as **perdas** de pacotes que afetam a classe/fila
    - classes mais **prioritárias** → valores  **$U_i$ ,  $L_i$**  mais **elevados**

57

### III. MULTIPLEXAGEM

**Gestão de filas de espera**



**Escalonamento**

- **Escalonamento**: pacote da classe com maior  $P_i$  é selecionada para transmissão

$$P_i = \text{atraso\_em\_fila\_pacote\_cabeça\_fila}_i * \text{parâmetro } U_i$$

- **Gestão filas**: em caso de buffer *overflow* é eliminado um pacote da classe com menor  $P_i$

$$P_i = \%perdas\_classe_i * \text{parâmetro } L_i$$

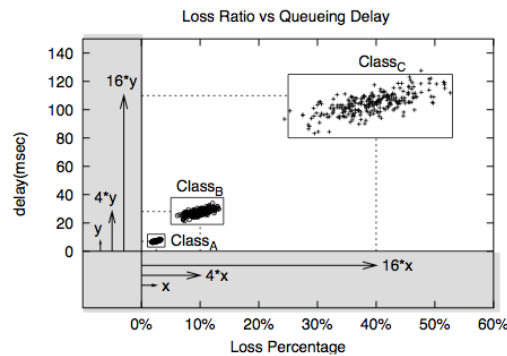
58



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

- **Exemplos ilustrativos** de diferenciação relativa de tráfego (3 classes de tráfego):



*Proportional loss and proportional delay differentiation models for  $(L_A, L_B, L_C) = (16, 4, 1)$  and  $(U_A, U_B, U_C) = (16, 4, 1)$ .*

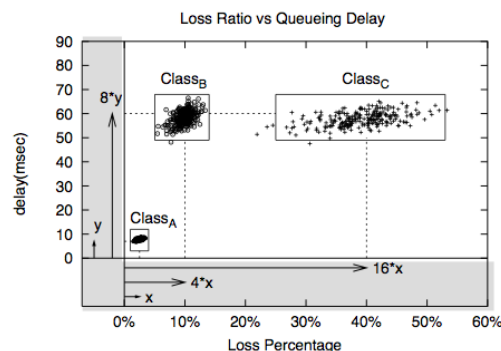
59



### III. MULTIPLEXAGEM

#### TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

- **Exemplos ilustrativos** de diferenciação relativa de tráfego (3 classes de tráfego):



*Proportional loss and proportional delay differentiation models for  $(L_A, L_B, L_C) = (16, 4, 1)$  and  $(U_A, U_B, U_C) = (8, 1, 1)$ .*

60



### III. MULTIPLEXAGEM

#### FDM (Multiplexagem por Divisão de Frequências)

- Técnica em que cada fonte ocupa uma **fracção da largura de banda** disponível durante todo o tempo

Contrariamente ao TDM em que cada fonte ocupa toda a largura de banda disponível durante parte do tempo

- Método mais antigo...
- Método que surgiu inicialmente associado à transmissão analógica (ex. rádio)



### III. MULTIPLEXAGEM

#### FDM (Multiplexagem por Divisão de Frequências)

- No mesmo suporte físico coexistem simultaneamente **vários canais FDM**
- Sinais de cada canal são **modulados em portadoras** de diferentes frequências
- Na recepção o sinal composto é apresentado a um conjunto de **N filtros passa banda** que permitem isolar cada uma das suas componentes (canais)
- Em cada canal efectua-se uma **desmodulação** permitindo a recuperação do sinal original desse canal

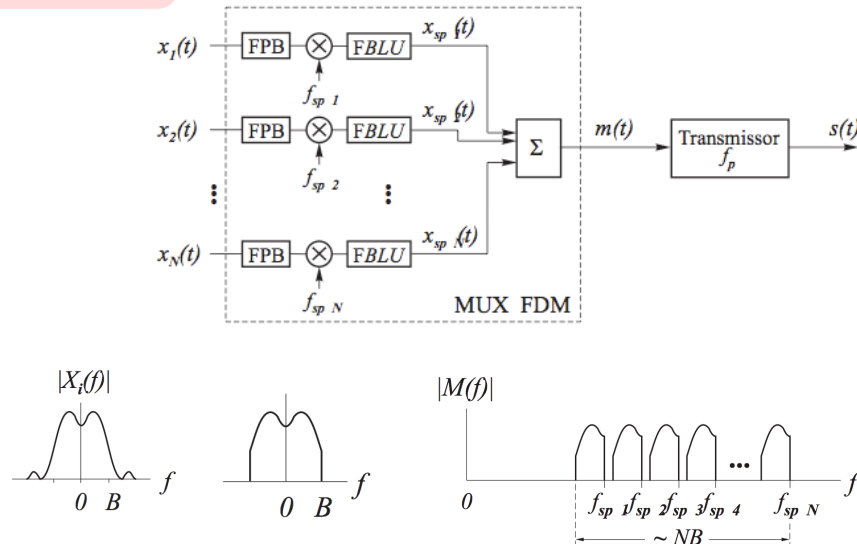




### III. MULTIPLEXAGEM

#### FDM (Multiplexagem por Divisão de Frequências)

... na transmissão:



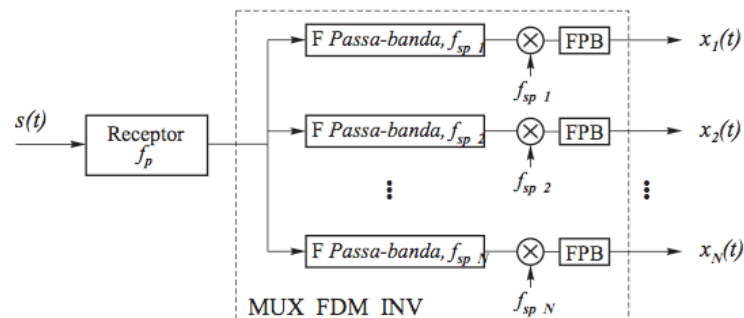
63



### III. MULTIPLEXAGEM

#### FDM (Multiplexagem por Divisão de Frequências)

... na recepção:



64



### III. MULTIPLEXAGEM

#### FDM (Multiplexagem por Divisão de Frequências)

- Tal como no caso do TDM, existem especificações de **hierarquias de multiplexagem FDM**, exemplo:
  - as que assumem como canal básico de referência o canal de voz (com  $B=4\text{KHz}$ ) ... definindo-se depois vários níveis de hierarquias

**Nível 1** – multiplexa 12 canais de 4KHz em sub-portadoras 64, 68, 72, ..., 108 KHz, resultando num sinal composto com largura de banda = 48KHz

**Nível 2** – multiplexa 5 entradas do nível anterior.....

**Nível 3** ....

....

65



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Esquemas combinados FDM/TDM

- Possibilidade da utilização **esquemas híbridos envolvendo TDM e FDM**

**Exemplo** – comunicação entre uma estação base e diversos dispositivos (utilizadores)

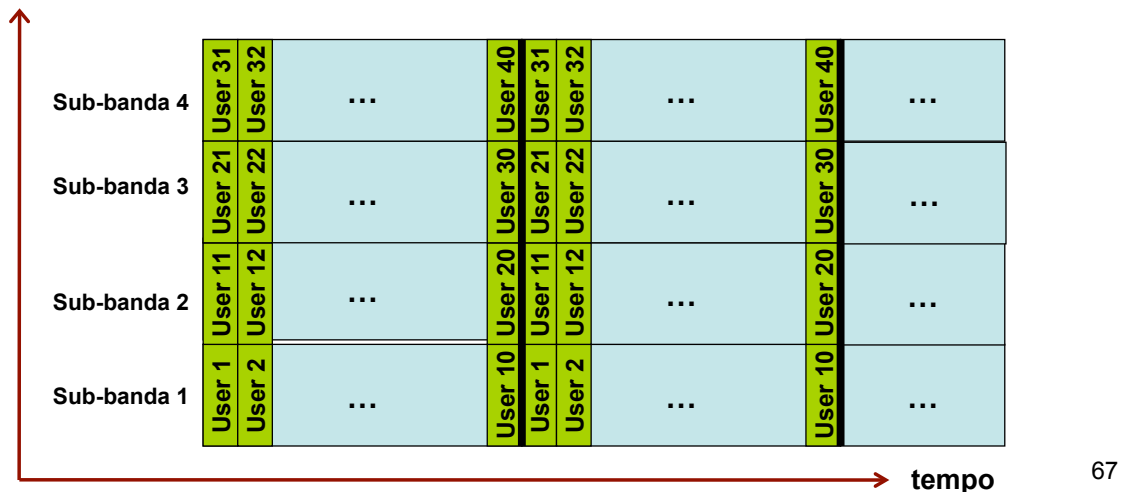
- estação base divide a banda de transmissão disponível do canal em várias **sub-bandas** ...
- .... temporalmente define também “espaços” temporais (**time slots**) que no seu conjunto formam uma trama
- A cada dispositivo é atribuída uma frequência e *um time slot*

66

### III. MULTIPLEXAGEM

#### Exemplo - Esquemas combinados FDM + TDM

Esquema resultante da divisão da banda de transmissão em 4 sub-bandas e da divisão temporal em 10 slots por trama



### III. MULTIPLEXAGEM

#### Exemplos de outras Técnicas ... (breve referência)

- Alguns métodos de acesso ao canal são baseados noutros paradigmas que não FDM ou TDM ...
- e.g. uma das versões do método de acesso ao canal denominado por **CDMA (Code division multiple access)**
  - possibilidade do canal ser usado por diversos intervenientes **ao mesmo tempo** e na **mesma gama de frequências**... interferência entre as comunicações!! ... mas **de uma forma controlada**
  - cada dispositivo interveniente na comunicação possui um “**código**” que permite codificar (descodificar – na receção) os dados por si enviados



### III. MULTIPLEXAGEM

#### FDM ..... TDM ... utilização de CDMA

- Analogia - imaginar uma sala com vários pares/grupos de pessoas a conversarem....
  - **TDM** - por turnos...fala um par de cada vez ...
  - **FDM** - cada par fala em frequências diferentes ...
  - **CDMA** – cada par fala em *linguagens* diferentes (mesmo que ao mesmo tempo e nas mesmas frequências)
    - só intervenientes que falam a mesma linguagem podem comunicar entre si... não conseguem entender os outros intervenientes

69

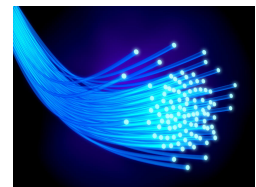


### III. MULTIPLEXAGEM

#### Outras Técnicas de Multiplexagem

#### Wavelength-division multiplexing (WDM)

(breve referência)



- Utilizado em sistemas de comunicação com **fibras ópticas**
- Permite a transmissão **vários sinais ópticos** sobre a mesma fibra
- Cada sinal (luz) é transmitido utilizando **diferentes comprimentos de onda** (daí que por vezes se refira → diferentes cores)
- **WDM** semelhante ao FDM (frequência e comprimento de onda estão relacionados) mas é um termo mais usado em **contextos de transmissão óptica**

70

### III. MULTIPLEXAGEM

#### Outras Técnicas de Multiplexagem

#### Wavelength-division multiplexing (WDM)

- Sistemas WDM são comuns nas companhias de telecomunicações pois permitem aumentar a capacidade da rede sem necessidade de acrescentar mais fibra
- ... capacidade dos links pode ser aumentada simplesmente atualizando os multiplexadores (de)multiplexadores nas terminações da fibra

