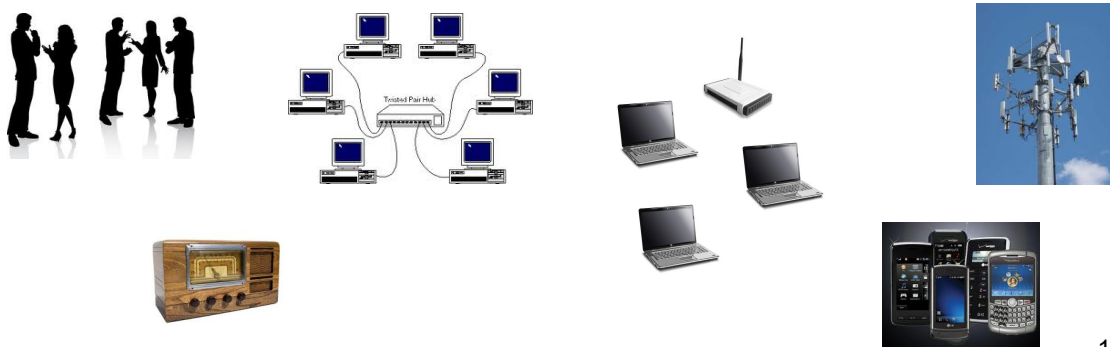




III. MULTIPLEXAGEM

- 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)
 - ... 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



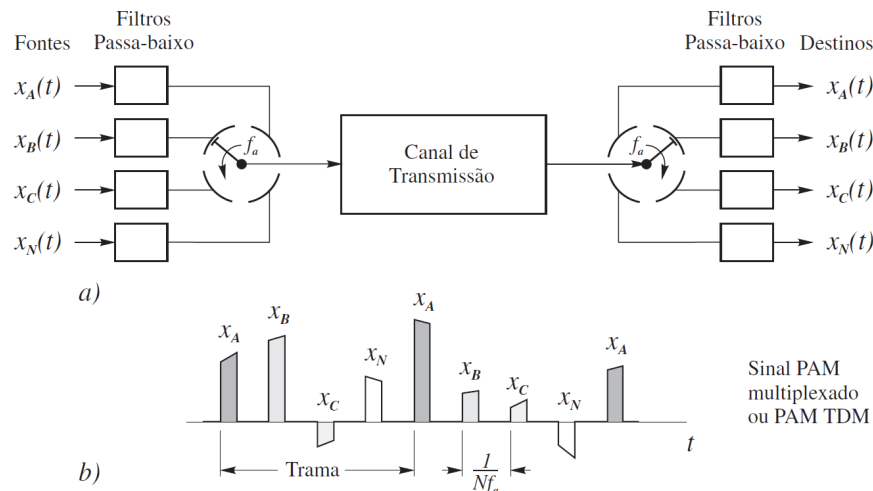
III. MULTIPLEXAGEM

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

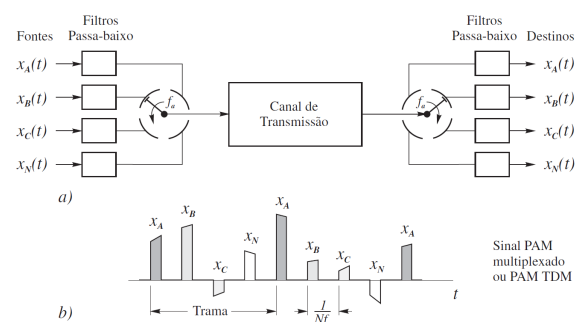
TDM - Exemplo de Multiplexagem por Divisão de Tempo



5

III. MULTIPLEXAGEM

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



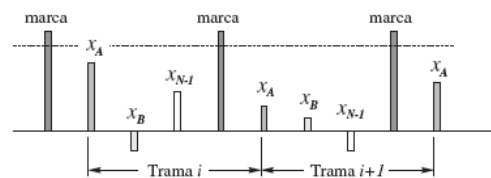
- Neste exemplo uma **trama** será um conjunto, ordenado no tempo, com uma amostra de cada entrada
- Ritmo de pulsos PAM no canal será de $r_c = N \cdot f_a \geq N \cdot 2 \cdot B$
- Considerando digitalização** no canal estariam os **bits** representativos de cada uma das amostras

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

Nos exemplos referidos anteriormente:

- 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**
- Exemplos: Sistemas de multiplexagem PCM, Hierarquias de multiplexagem PDH e outras



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

TDM SÍNCRONO

- **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

primeiros sistemas de multiplexagem - vamos ver alguns dos seus fundamentos

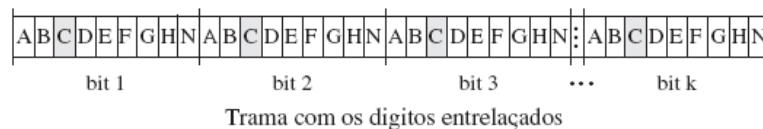
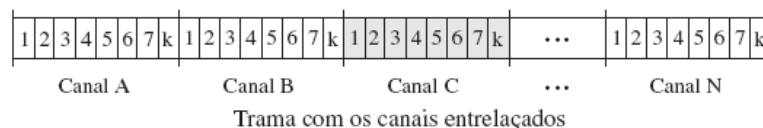
11



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.

>> Histerese a reacção do desmultiplexador a uma perda do alinhamento deve ser retardada, i.e. ser feita ao longo de um intervalo temporal suficiente para não se confundir com erros de transmissão.

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)



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).

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

17

III. MULTIPLEXAGEM

Exemplo - Trama PCM Primária de 2 Mbps

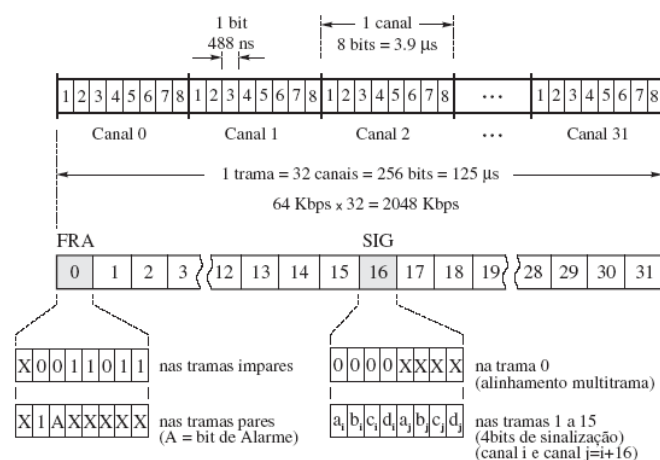


Figura 6.6: Estrutura da trama de multiplexagem PCM de 2 Mbps

18

III. MULTIPLEXAGEM

Exemplo - Trama PCM Primária de 1.5 Mbps

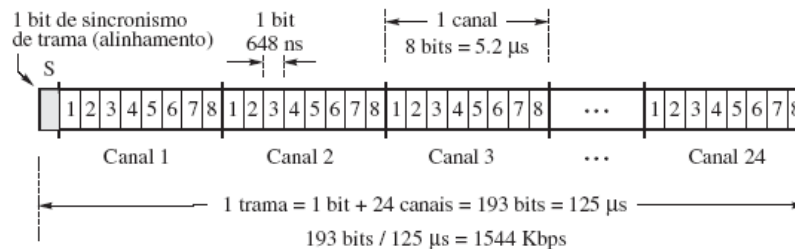


Figura 6.9: Estrutura da trama de multiplexagem PCM de 1.5 Mbps

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



III. MULTIPLEXAGEM

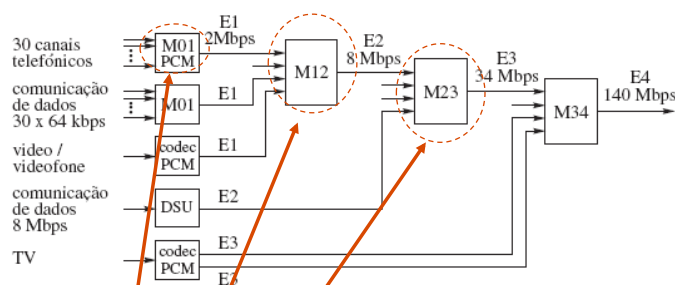


Figura 6.11: Exemplo de uma multiplexagem PDH Europeia

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			

21



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

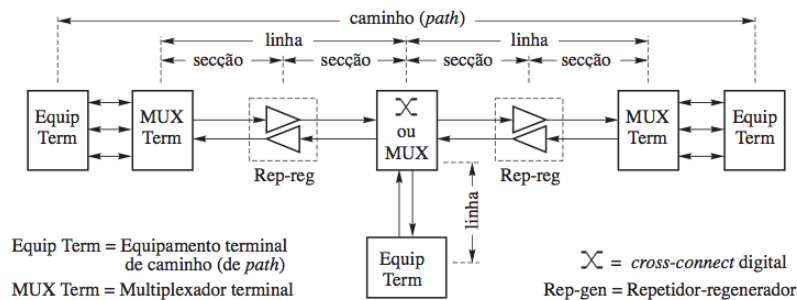
22



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**

23



III. MULTIPLEXAGEM

Exemplo de Trama Básica SONET

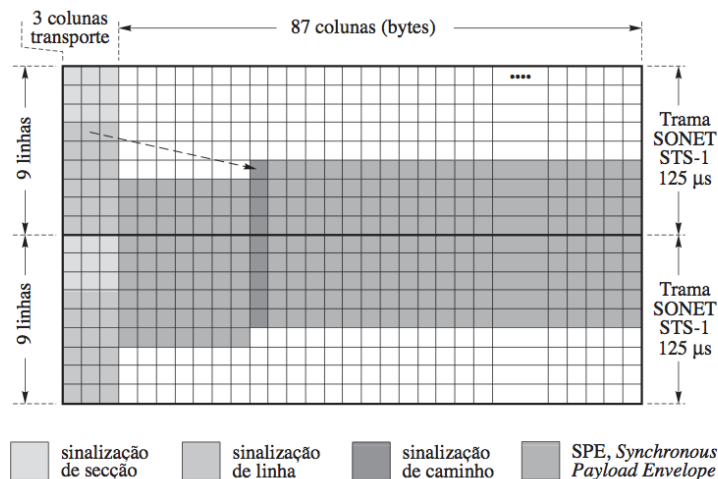
- Tramas constituídas por blocos de 810 bytes
- Duração 125 microseg. (coincide com o período de amostragem PCM)...
- 8000 tramas por segundo
- Tramas podem vistas como uma matriz de bytes (90 colunas, 9 linhas)
- $90 * 9 = 810 \text{ bytes} * 8000 = 51.84 \text{ Mbps}$ ritmo do **canal básico SONET**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

24



III. MULTIPLEXAGEM

Exemplo de Trama Básica SONET (STS-1)



25



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

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

26

III. MULTIPLEXAGEM

Exemplo de um cenário de multiplexagem SDH

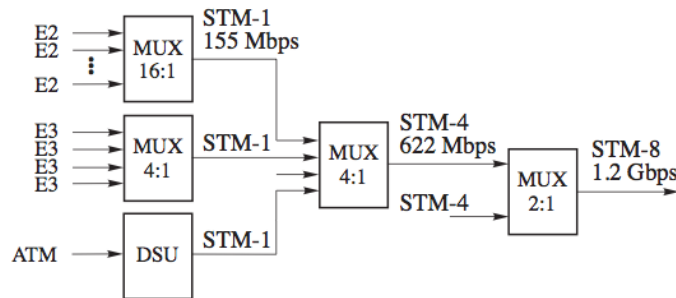


Figura 6.17: Multiplexagem hierárquica SDH

27

III. MULTIPLEXAGEM

TDM ESTATÍSTICO

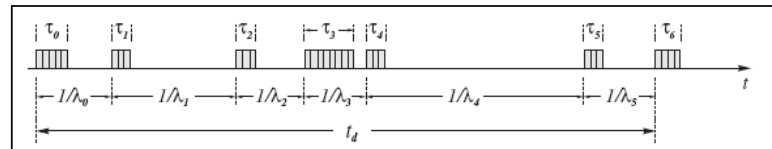
- Multiplexagem síncrona mais apropriada para transmissão digitalizada de fontes que produzem informação a um **ritmo constante**, sem interrupções
- Existem cenários em que tal não é usual
- Tráfego produzido pelas aplicações computacionais é muitas vezes de **natureza aleatória**
- Outros tipos de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

28

III. MULTIPLEXAGEM

TDM ESTATÍSTICO

- Exemplo de tráfego de natureza aleatória



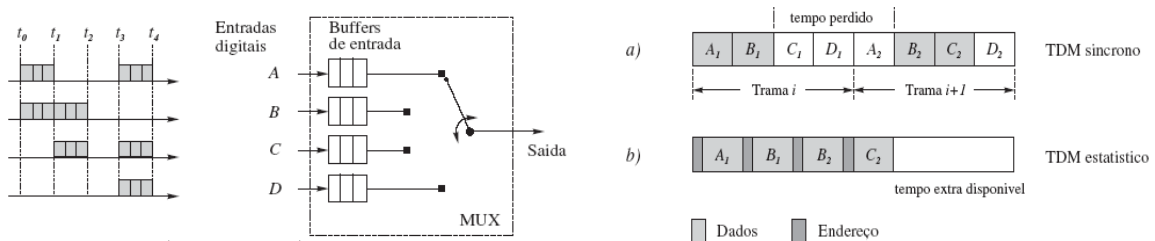
o valor médio de λ_i é o número médio de DUs produzidas por segundo

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

29

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**

30



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**

31



III. MULTIPLEXAGEM

MODELAÇÃO DE TRÁFEGO

- 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 ...

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)

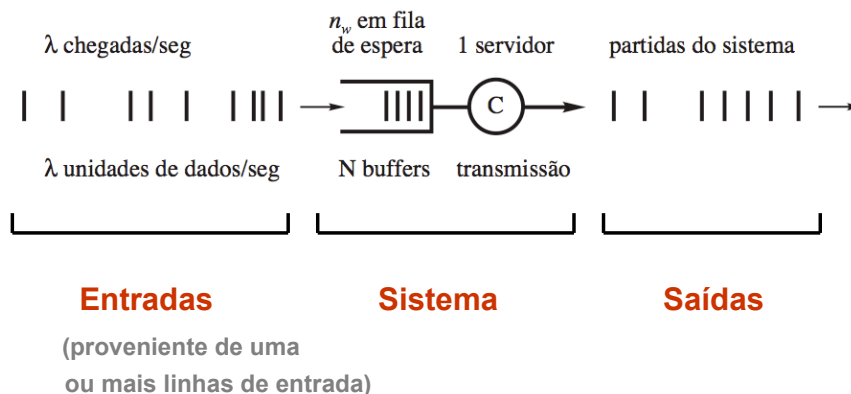
32



III. MULTIPLEXAGEM

MODELAÇÃO DE TRÁFEGO EM MULTIPLEXADORES ESTATÍSTICOS

Modelação por Filas de Espera



33



III. MULTIPLEXAGEM

TDM ESTATÍSTICO – MODELO M/D/1

- **Ritmo Médio de Chegadas, λ**
Numero 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%)) **α** então:

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

- Se linhas de entrada com ritmos e **α** diferentes:

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

34



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, Rbs

k e rbs expressos em unidades coerentes, ex: bits e bps ou outras

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

- **Utilização do Servidor, ρ**
se $\rho < 1$ então sistema em equilíbrio

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

35



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 -> \bar{t}_w

- **Número médio de DUs no multiplexador**

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

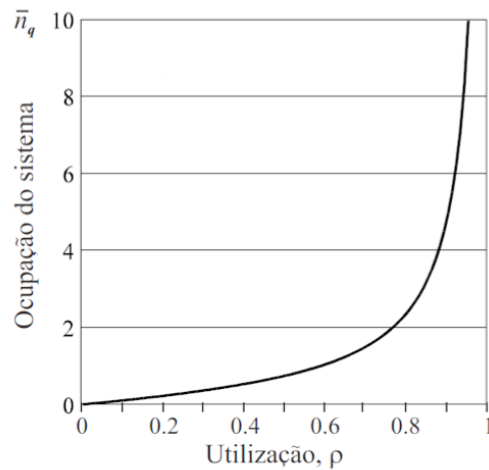
em fila -> \bar{n}_w

36



III. MULTIPLEXAGEM

MODELO M/D/1 - Exemplo de Resultados

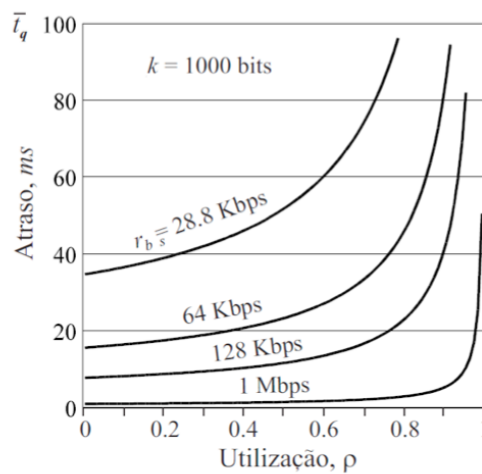


37



III. MULTIPLEXAGEM

MODELO M/D/1 - Exemplo de Resultados



38



III. MULTIPLEXAGEM

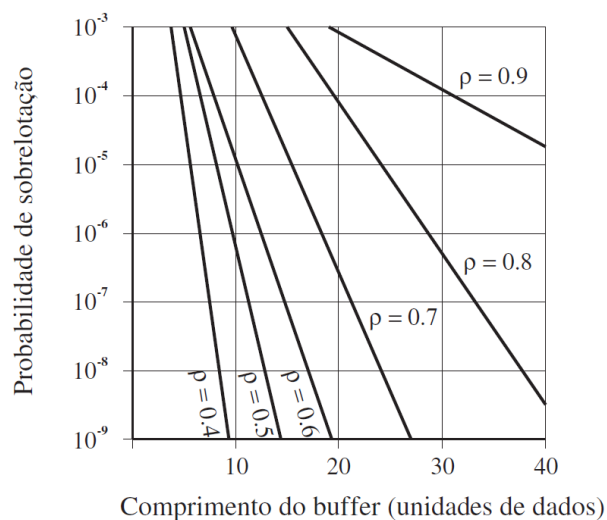
- Com as formulas apresentadas anteriormente é possível obter **valores médios** para a ocupação dos *buffers*
- No entanto durante a operação do multiplexador os valores de ocupação podem exceder bastante a média
- Como obter valores para as probabilidades de sobrelotação para um **determinado tamanho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

39



III. MULTIPLEXAGEM

MODELO M/D/1 - Probabilidade de Sobrelotação



40

III. MULTIPLEXAGEM

TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

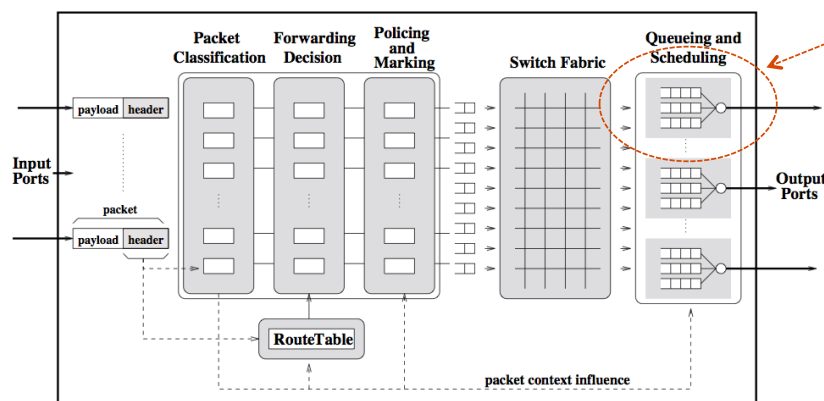
- A base teórica dos modelos de filas de espera é importante para o estudo/implementação de diversos equipamentos de rede
- e.g. Routers – equipamento de interligação de redes
 - os mecanismos de gestão de filas de espera e estratégias escalonamento de pacotes são essenciais para o tratamento dos pacotes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

41

III. MULTIPLEXAGEM

TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

- Exemplo (conceptual) de uma arquitectura de um router



42



III. MULTIPLEXAGEM

TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

- As diferentes estratégias de escalonamento e gestão de filas afectam as diferentes **classes de tráfego**
 - exemplo: **débitos obtidos**, **perdas**, **atrasos**, ...
 - relação directa com a **qualidade de serviço** obtida pelas aplicações que usam a infra-estrutura de comunicações
 - podem ser usadas inúmeras **alternativas** de estratégias de escalonamento de tráfego e gestão de filas de espera

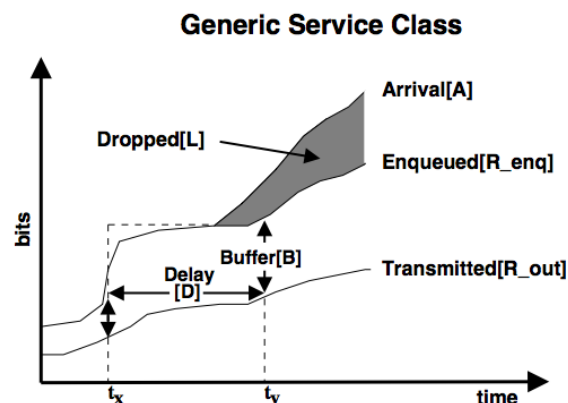
43



III. MULTIPLEXAGEM

TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

- ...exemplo do comportamento de uma determinada *classe de tráfego*

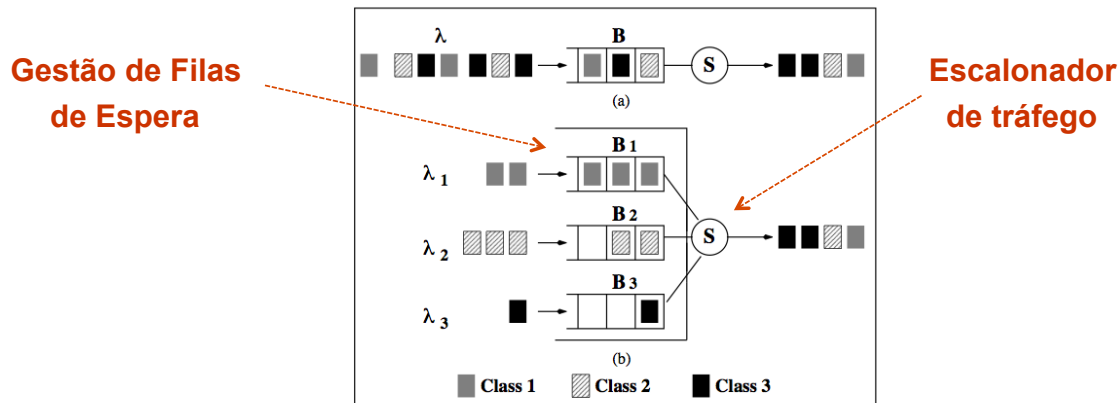


44

III. MULTIPLEXAGEM

TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

- Para conseguir algum tipo de **diferenciação de tráfego** é necessária a utilização de estratégias de filas espera/escalonamento apropriadas



45

III. MULTIPLEXAGEM

TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

- 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**
- Gestão do espaço de *buffering* pode assumir características **dinâmicas** ou **estáticas**
- Insuficiência de recursos? *drop tail*, *push-out* ou outros (e.g. com características probabilísticas – nota: RED vs tráfego TCP)

46

III. MULTIPLEXAGEM

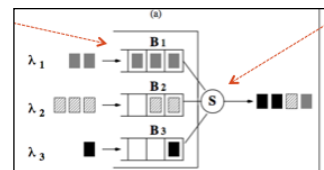
TDM ESTATÍSTICO – Questões Relacionadas

- Exemplos de classificações de estratégias de escalonamento de pacotes
 - work conserving: escalonador só não transmite pacotes no caso das filas estarem vazias
 - non-work-conserving:
 - strict priority: pacotes com prioridades mais altas tem sempre prioridade sobre os outros pacotes... (consequência?)
 - outras categorias: fair queueing (bastante comum), deadline based, rate based
 - ... etc ...

47

III. MULTIPLEXAGEM

- Exemplo ilustrativo de **diferenciação relativa** de tráfego:



- Gestão de n filas dinâmicas + Escalonamento pacotes aplicando **modelos de proporcionalidade**
- Atraso**: Prioridade da classe _{i} (P_i) - classe com maior P_i é seleccionada para transmissão

$$P_i = \text{atraso_em_fila_pacote_cabeça_fila}_i * \text{parâmetro } U_i$$

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

$$P_i = \%perdas_class_i * \text{parâmetro } L_i$$

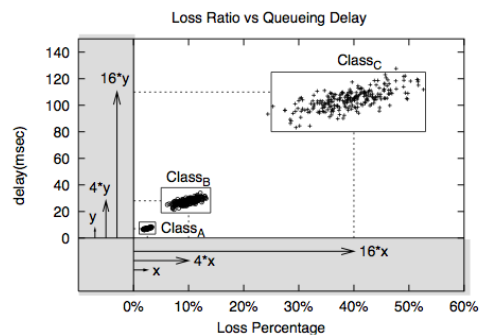
48



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 $(U_A, U_B, U_C) = (16, 4, 1)$.

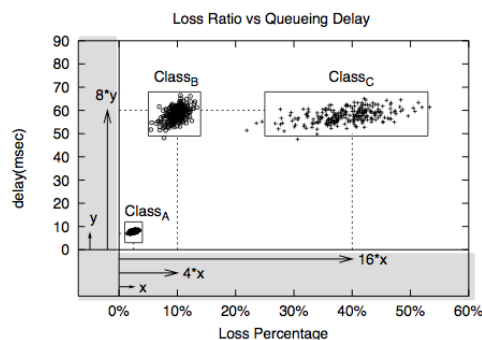
49



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 $(U_A, U_B, U_C) = (8, 1, 1)$.

50



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

51



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 canal efectua-se uma **desmodulação** permitindo a recuperação do sinal original desse canal

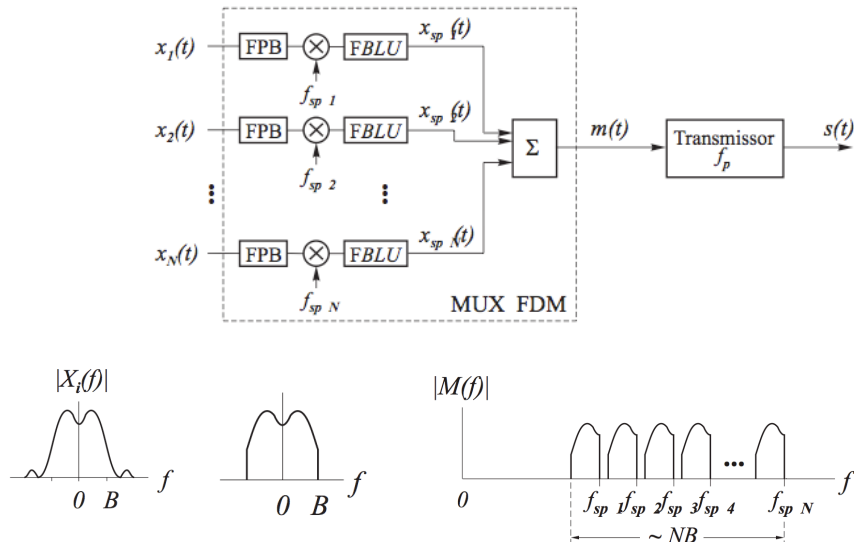
52



III. MULTIPLEXAGEM

FDM (Multiplexagem por Divisão de Frequências)

... na transmissão:



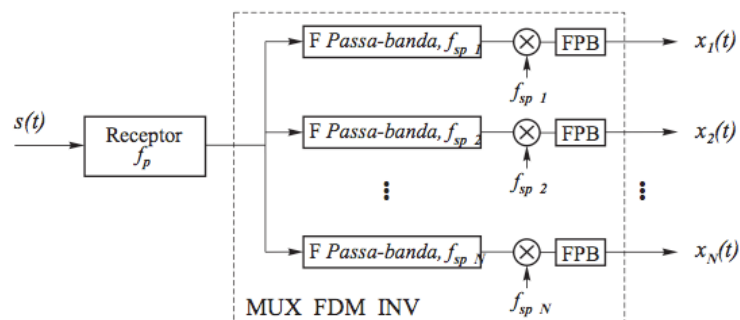
53



III. MULTIPLEXAGEM

FDM (Multiplexagem por Divisão de Frequências)

... na recepção:



54



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

....

55



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)

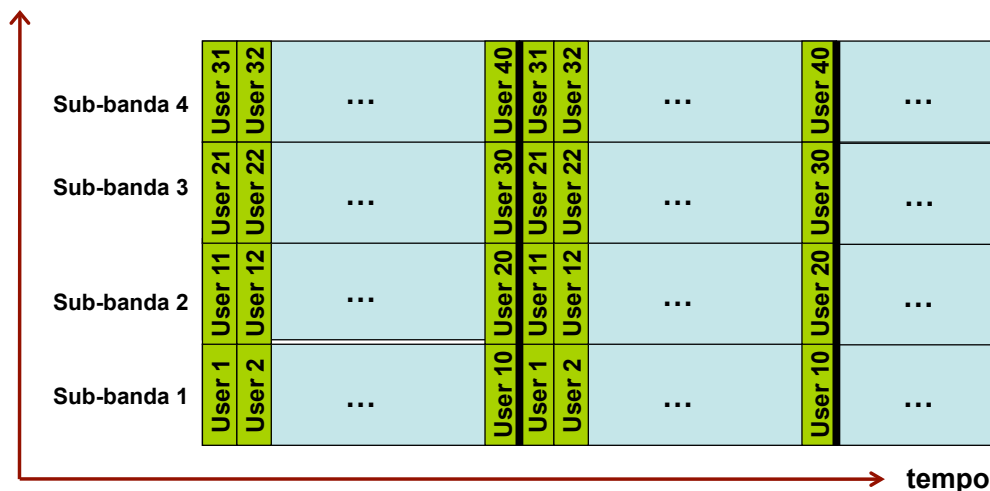
- estação base divide a banda de transmissão disponível do canal em várias **sub-bandas** ...
- temporalmente define também “espaços” temporais (**time slots**) que no seu conjunto formam uma trama
- A cada dispositivo é atribuída uma frequência e *um time slot*

56

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



57

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

58



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