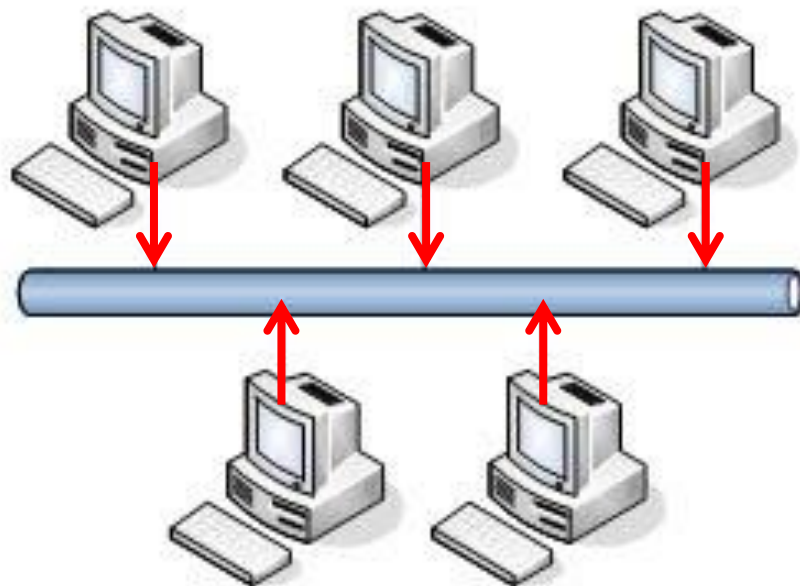


# Parte IV: Sub-Nível de Acesso ao Meio (refs.)

- Alocação estática versus dinâmica  
(Tanenbaum 2003, 4.1; Stallings Ch. 6)
- Protocolos ALOHA (puro e sincronizado) e sua análise  
(Tanenbaum 2003, 4.2)
- Os protocolos IEEE 802: IEEE 802.3, IEEE 802.11  
(Tanenbaum 2003, 4.3-4.6; Stallings Ch. 16 e 17)
- Interligação de redes  
(Tanenbaum 2003, 4.7; Stallings Ch. 15)

# Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control Sublayer*)

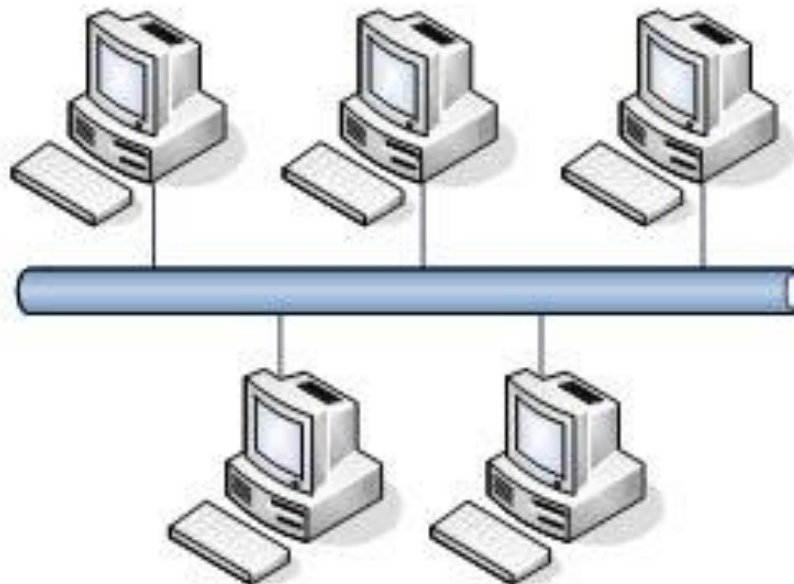
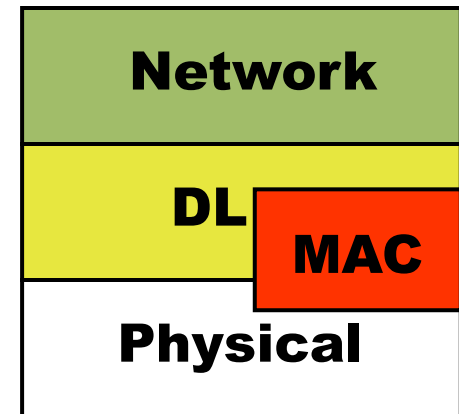
- Como é que controlamos o acesso a um meio de transmissão partilhado por múltiplos utilizadores de forma dinâmica?



# Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control Sublayer*)

*Medium Access Control (MAC) Sublayer:*

- Implementa as funcionalidades de um subnível entre o nível ligação de dados (transmissão de tramas) e o nível físico (detecção das colisões)



# Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control Sublayer*)

- **Alocação estática (e.g., TDM, FDM)**

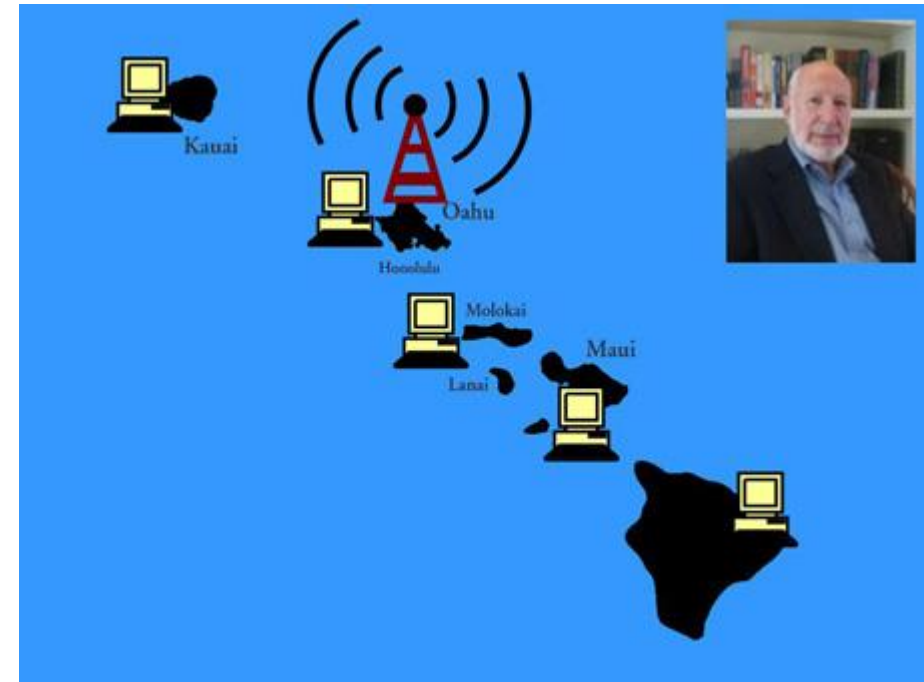
- Capacidade do canal  $C$  bit/s
- Taxa de chegada de  $\lambda_A$  trama/s
- Comprimento da trama segundo uma exponencial de média  $1/\mu$  bits/trama
- Atraso médio: 
$$T_1 = T_Q + T_{Tx} = \frac{1}{\lambda_S} \left( \frac{\rho}{1-\rho} \right) + \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{\lambda_S - \lambda_A} = \frac{1}{\mu C - \lambda_A}$$
- Se os canais forem todos iguais a  $C/N$  bit/s e se cada fonte gerar apenas  $\lambda_A / N$  tramas/s .
- Atraso médio: 
$$T_N = \frac{1}{\mu(C / N) - (\lambda_A / N)} = \frac{N}{\mu C - \lambda_A} = NT_1$$

# Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control Sublayer*)

- **Alocação dinâmica - hipóteses:**
  - $N$  estações independentes (não há coordenação)
  - Um único canal partilhado por todas as estações
  - Colisões (receptor “escuta” duas ou mais transmissões)
  - Característica temporal:
    - Tempo contínuo “*Continuous Time*”
    - Tempo às fatias “*Slotted Time*”
  - Escuta do canal:
    - Com detecção de portadora “*Carrier Sense*”
    - Sem detecção de portadora “*No Carrier Sense*”

# Sistema ALOHA: Motivação

- Interligação via rádio de terminais de computador com um computador central\* através de um processador de mensagens (o MENEHUNE\*\*) no arquipélago do Hawai
- Utilização de dois canais rádio:
  1. Do MENEHUNE para os terminais remotos - **sem colisões**
  2. Dos terminais remotos para o MENEHUNE com partilha dinâmica do canal rádio - **com colisões**
- Desenvolvido por Norman Abramson em 1971 na Universidade do Hawai



\* Central computer of "THE ALOHA SYSTEM" (IBM 360/65 with a 750 Kbyte core memory)

\*\* Interface Message Processor (HP 2115A with 16-bit word size and an 8 Kword core storage capacity)

# "The ALOHA System – Another Alternative for Computer Communications"

Norman Abramson

## Technical Report B70-1, April 1970

- *(...) random access method of multiplexing a large number of low data rate consoles into the MENEHUNE through a single radio communication channel.*
- *THE ALOHA SYSTEM has been assigned **two 100 KHz channels** at 407.350 MHz and 413.475 MHz. One of those channels has been assigned for data from the MENEHUNE to the remote consoles and the other for data from the consoles to the MENEHUNE. Each of these channels will operate at a **rate of 24,000 baud**.*
- *The **communication channel from the MENEHUNE to the consoles provides no problems**. Since the transmitter can be controlled and buffering performed by the MENEHUNE at the Computer Center, **messages from the different consoles can be ordered in a queue according to any given priority scheme and transmitted sequentially**.*

# "The ALOHA System – Another Alternative for Computer Communications"

Norman Abramson

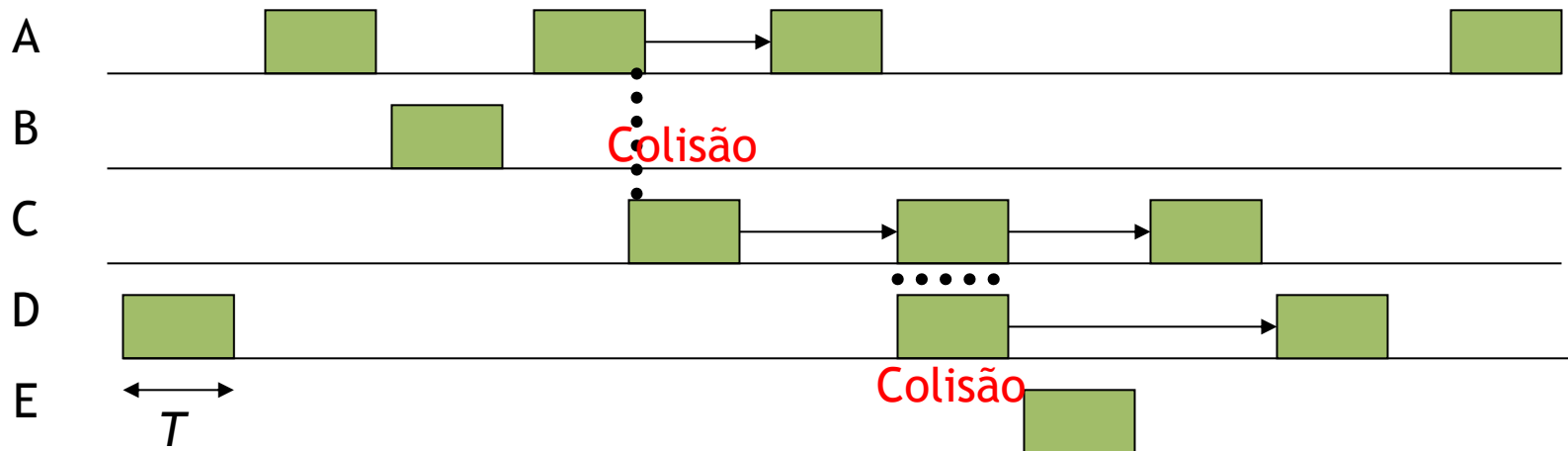
## Technical Report B70-1, April 1970

- *Messages from the remote consoles to the MENEHUNE however are not capable of being multiplexed in such a direct manner. If standard orthogonal multiplexing techniques (such as frequency or time multiplexing) are employed we must divide the channel from the consoles to the MENEHUNE into **a large number of low speed channels and assign one to each console, whether it is active or not.** Because of the fact that at any given time only a fraction of the total number of consoles in the system will be active and because of the burst nature of the data from the consoles such a scheme **will lead to the, same sort of inefficiencies found in a wire communication system.***
- *(...) THE ALOHA SYSTEM uses a **common** high speed **data channel without the necessity of central control or synchronization.***
- ***Information** to and from the MENEHUNE in THE ALOHA SYSTEM is **transmitted in the form of "packets"**, where each packet corresponds to a single message in the system [8]. Packets will have a fixed length of 80 8-bit character plus 32 bits identification and control bits and 32 parity bits; thus each packet will consist of 704 bits and will last for 29 milliseconds at a data rate of 24,000 baud. (...)*



# ALOHA Puro

Utilizador



- Cada estação transmite a trama assim que a mesma é gerada
- Caso o receptor “escute” mais que uma transmissão - **colisão**
- A indicação do sucesso é efectuado por ACKs (num canal diferente)
- Não gera uma trama nova enquanto a anterior não tem sucesso

## GRANDEZAS FUNDAMENTAIS:

$T$  - tempo de trama

$N$  - tramas novas por tempo de trama ( $0 < N < 1$ )

$G$  - (tramas novas + retransmitidas) por tempo de trama

$S$  - (tramas tx. c/ sucesso) por tempo de trama

## RELAÇÕES FUNDAMENTAIS:

$G \geq N$  (carga baixa  $G \approx N$ )

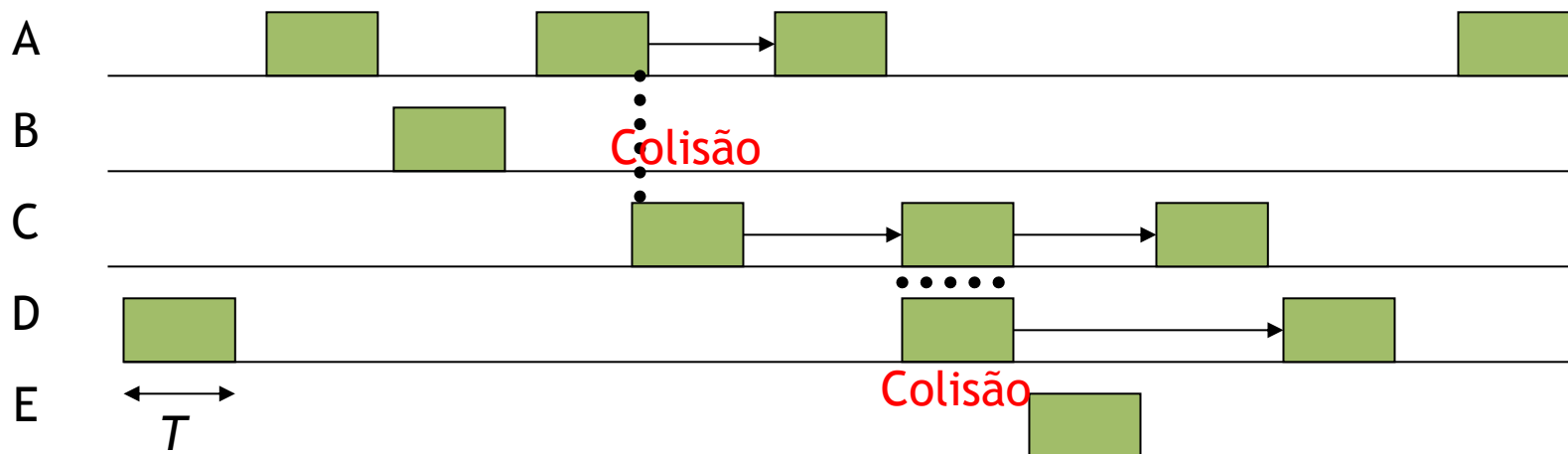
$N = S$  (em equilíbrio)

Desempenho  $S = G \cdot P_0$

$P_0$  - Prob. {trama tx. com sucesso}

# ALOHA Puro

Utilizador



Processo de Poisson com taxa de ocorrências  $\lambda_G$

$k$  - número de tramas em  $\Delta t$

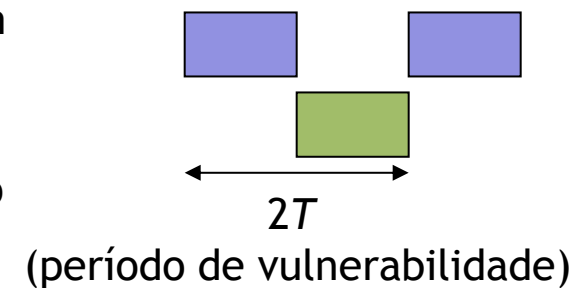
$$\Pr[k, \Delta t] = \frac{(\lambda_G \cdot \Delta t)^k e^{-(\lambda_G \cdot \Delta t)}}{k!}$$

$$\Pr[k, 2T] = \frac{(2G)^k e^{-(2G)}}{k!}, \quad G = \lambda_G \cdot T$$

$$P_0 = \Pr[0, 2T] = e^{-2G}$$

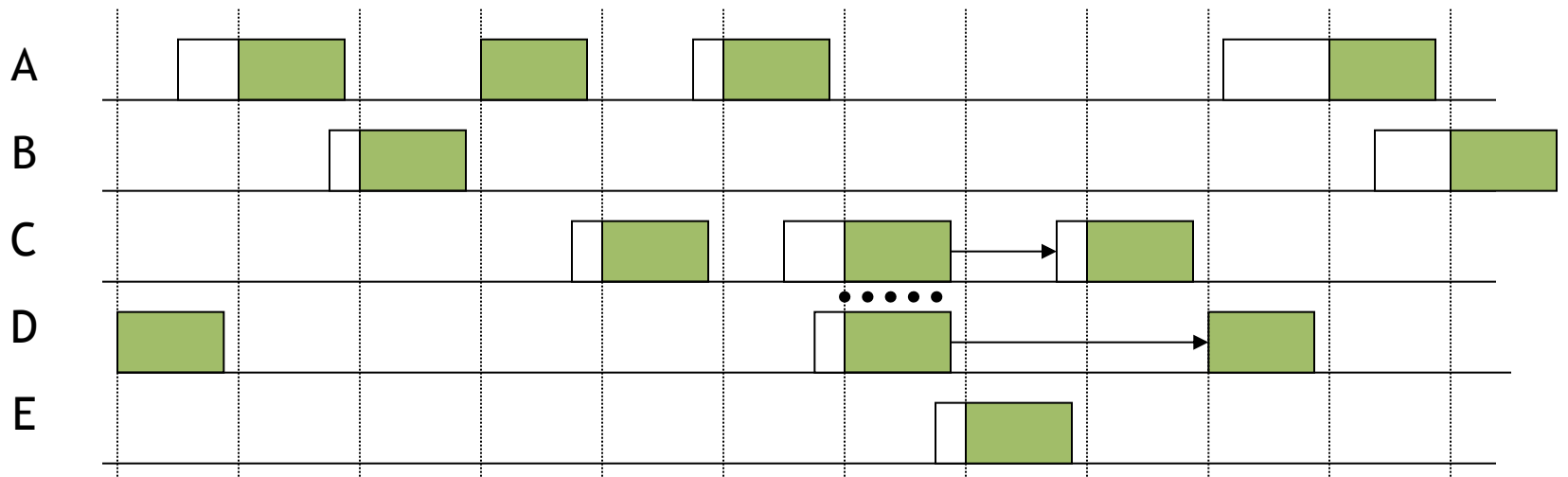
## CÁLCULO DO DESEMPENHO (S):

- Uma trama sofre colisão se alguém gerar outra trama no intervalo de tempo  $2T$
- Probabilidade de não gerar tráfego no período de vulnerabilidade é dada por:  $P_0 = e^{-2G}$
- O desempenho virá  $S = G \cdot e^{-2G}$



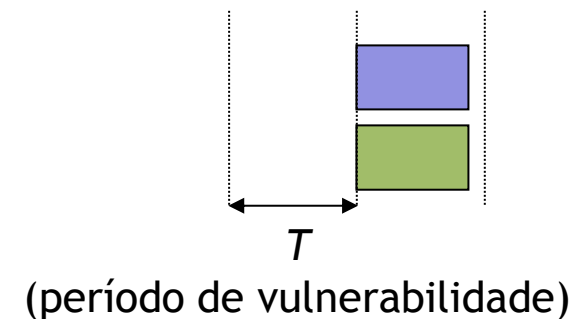
# Slotted ALOHA

Utilizador



## CÁLCULO DO DESEMPENHO ( $S$ ):

- Agora o período de vulnerabilidade passou para metade, i.e.,  $T$
- Uma trama sofre colisão se alguém gerar outra trama no intervalo de tempo  $T$
- Probabilidade de não gerar tráfego no período de vulnerabilidade é dada por:  $P_0 = e^{-G}$
- O desempenho virá  $S = G \cdot e^{-G}$

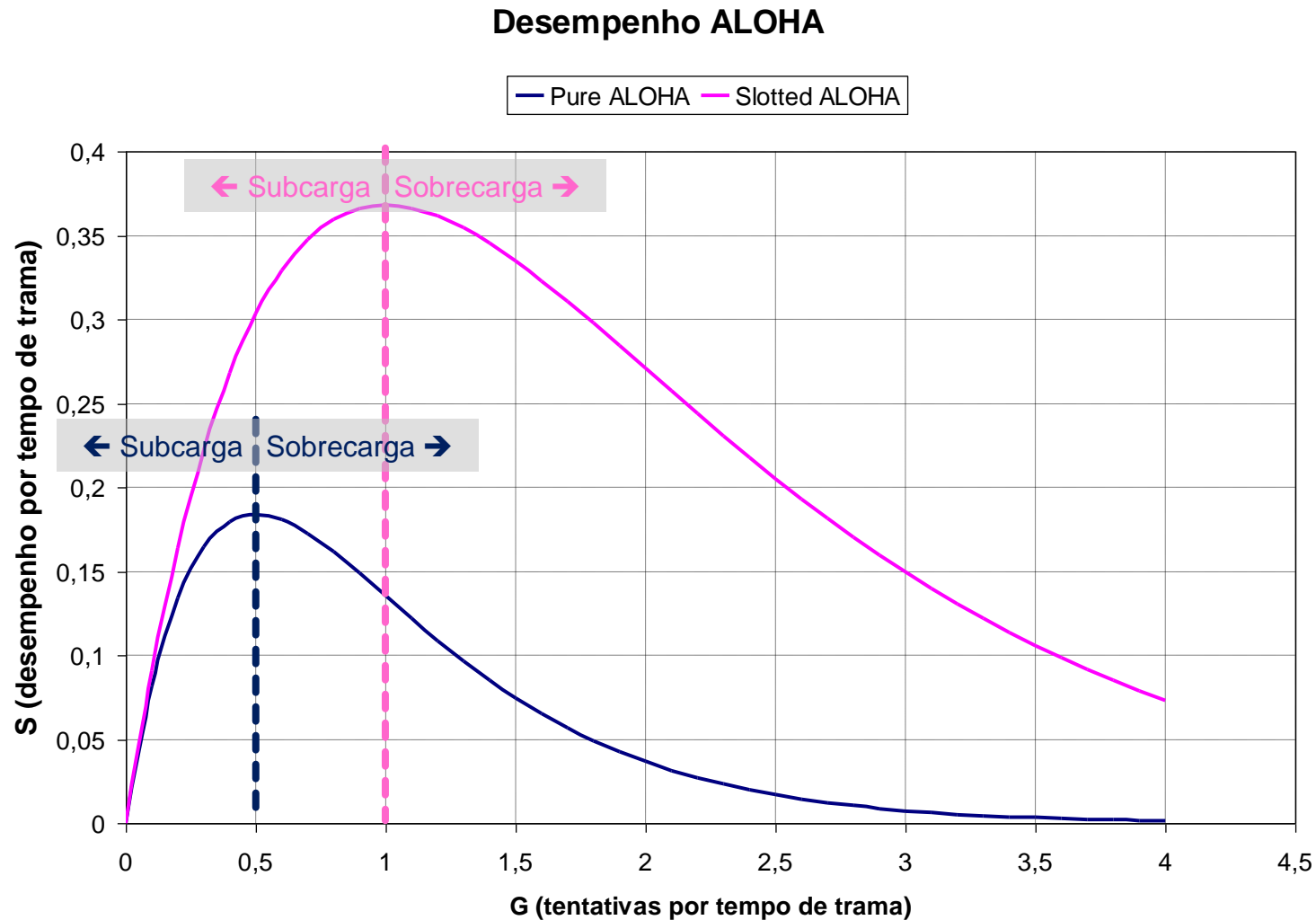


# Desempenho versus Tráfego

	Prob. Tx c/ Sucesso ( $P_0$ )	Desempenho ( $S$ )	Número médio de Tx por trama (#Tx)
ALOHA Puro	$e^{-2G}$	$Ge^{-2G}$	$e^{2G}$
Slotted ALOHA	$e^{-G}$	$Ge^{-G}$	$e^G$

- Prob. de não haver colisão:  $P_0$
- Prob. de haver colisão:  $1 - P_0$
- Prob. de uma trama ser transmitida  $k$  vezes:  $P_k = P_0 (1 - P_0)^{k-1}$
- Número médio de transmissões:  $E[\#Tx] = \sum_{k=1}^{+\infty} kP_k = \sum_{k=1}^{+\infty} kP_0 (1 - P_0)^{k-1} = \frac{1}{P_0}$

# Desempenho versus Tráfego



# Série 6 – Problema I

Sistema com 1000 fontes binárias que partilham um canal de acordo com o protocolo Aloha puro e cujo débito binário é  $R_b=10\text{kbit/s}$ . Fontes produzem tramas de 100 bits de comprimento.

- a) Calcule qual o tempo vulnerável de colisão para estas tramas neste sistema.
- b) Considere agora que o sistema se encontra a funcionar de tal forma que 10% das tramas oferecidas ao canal sofrem colisão.
  - i) Qual a carga (tráfego) oferecido ao canal?
  - ii) Qual o tráfego (carga) produzido pelo conjunto de todas as fontes?  
E por cada fonte individual (expresso em tramas por duração de trama e em tramas por segundo) ?
  - iii) Qual o número médio de transmissões efectuadas para cada trama?
  - iv) O sistema encontra-se em subcarga ou sobrecarga?

## Série 6 – Problema II

Suponha que um sistema utiliza o Aloha sincronizado (*slotted*) como método de acesso ao meio partilhado. Considere que as estações produzem em média 100 bit/s e que partilham um canal com um ritmo binário,  $R_b = 64$  kbit/s.

- a) Qual o número máximo de fontes que se consegue multiplexar e qual a taxa de utilização do meio nessa situação? (Para simplificar utilize a aproximação para um número infinito de fontes e diga qual a relevância desta hipótese).
- b) Na situação de utilização máxima qual a probabilidade de uma trama oferecida ao canal sofrer colisão?

# Série 6 – Problema III

Considere que possui uma linha de comunicação com um comprimento de 200 m ( $v_p = 200000$  km/s) e um débito binário de 10 Mbit/s que é partilhada por múltiplas estações. Cada estação gera tramas com um comprimento de 512 bytes.

- a) Assumindo que a estratégia adoptada para a partilha do acesso ao meio é *Aloha* puro, em que o tempo médio para a retransmissão de uma trama em caso de colisão é dez vezes a duração da trama ( $T$ ), calcule os seguintes valores para três cenários de carga total oferecida ao canal caracterizados por  $G = 0.1$ ,  $G = 0.9$  e  $G = G_{opt}$ :
  - A probabilidade de uma trama não sofrer colisão ( $P_0$ ).
  - A taxa de utilização do meio de transmissão, i.e., o desempenho ( $S$ ).
  - O número médio de tentativas de transmissão por trama ( $N_T$ ).
  - O atraso médio desde a geração da trama até ao fim da sua transmissão com sucesso ( $D$ ).
- b) Repita a alínea anterior para uma estratégia de partilha do acesso ao meio *Slotted Aloha*.
- c) Repita a alínea a) para uma estratégia de partilha do acesso ao meio CSMA/CD não persistente. Assuma que o tempo médio para a retransmissão de uma trama em caso de colisão ou não transmissão devido à ocupação do meio é dez vezes a duração da trama. Considere neste caso que  $G_{opt} \times \beta = 0.43$ , com  $\beta = \tau/T$ , em que  $\tau$  é o tempo de propagação entre as duas estações mais distantes no meio de transmissão.
- d) Compare as três técnicas com base nos resultados obtidos.

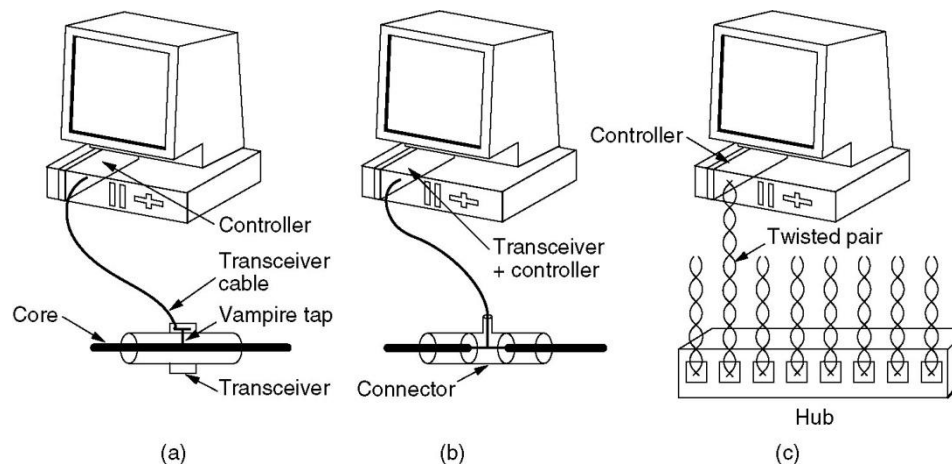


# IEEE 802.3/Ethernet

- Nível Físico
  - Cablagem
  - Codificação de Linha (Manchester)
- Nível de Ligação de Dados
  - Estrutura da Trama
  - Protocolo de Controlo de Acesso ao Meio
  - Algoritmo de Resolução de Colisões: *Binary Exponential Backoff*
- Desempenho
- Algumas Evoluções da Norma IEEE 802.3/Ethernet
  - Switched Ethernet
  - Fast Ethernet
  - Gigabit Ethernet

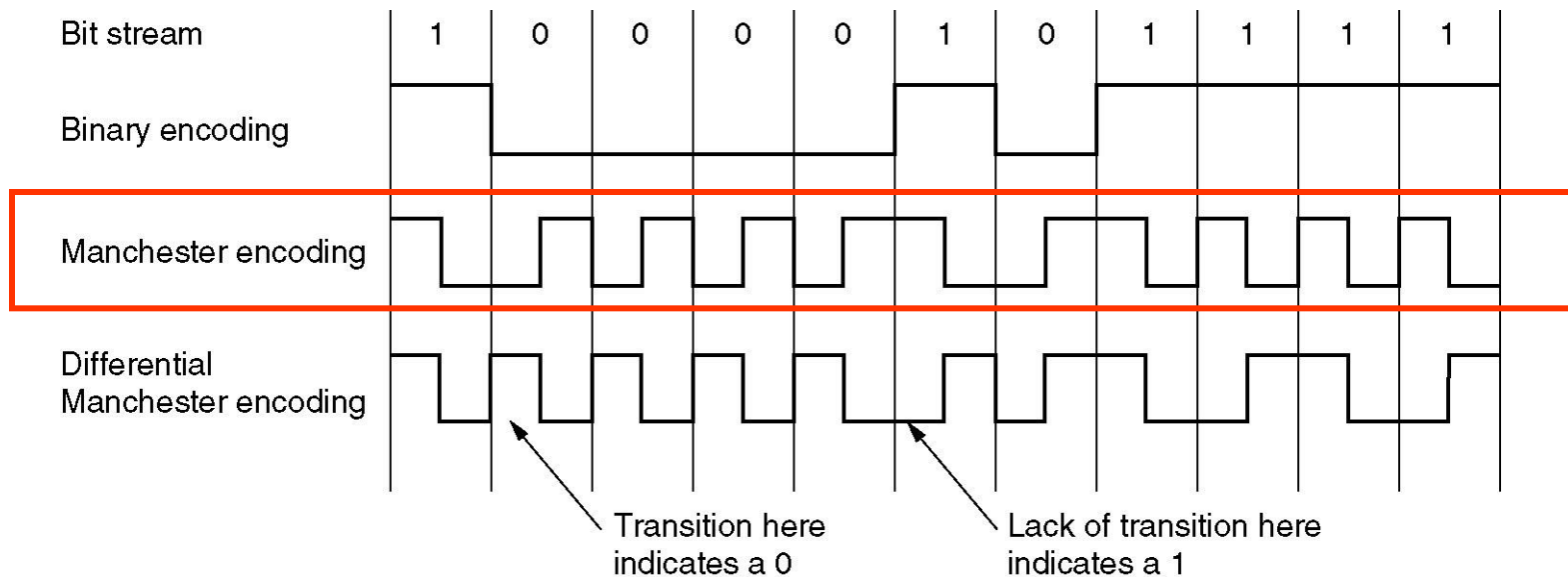
# IEEE 802.3/Ethernet: Cablagem

Nome	Cabo	Comp. seg.	Nós/seg.	Características
10Base5	Coaxial grosso	500m	100	Pouco utilizado hoje em dia
10Base2	Coaxial fino	200m	30	Sem Hubs
10Base-T	Par entrançado	100m	1024	Manutenção fácil
10Base-F	Fibra óptica	2000m	1024	Ligação entre edifícios



(a) 10Base5, (b) 10Base2, (c) 10Base-T.

# IEEE 802.3/Ethernet: Codificação de Linha

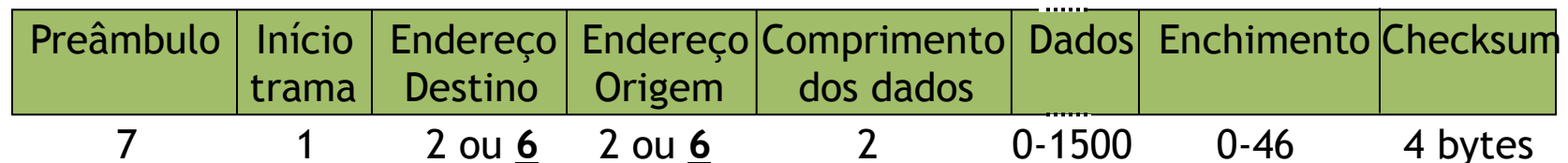


## • Código de Manchester:

- 2 x LB;
- $V_{min} = -0,85 \text{ V}$ ,  $V_{max} = +0.85 \text{ V}$ ;
- $DC = 0 \text{ V}$

# IEEE 802.3/Ethernet: Estrutura da Trama

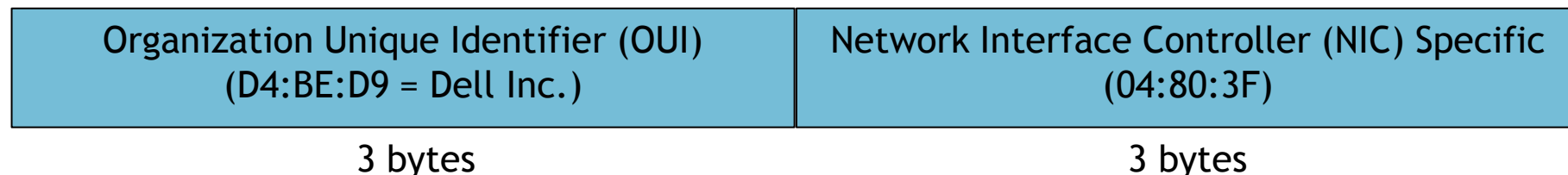
Estrutura da Trama:



Preâmbulo: 7 x 10101010; Início de trama: 10101011

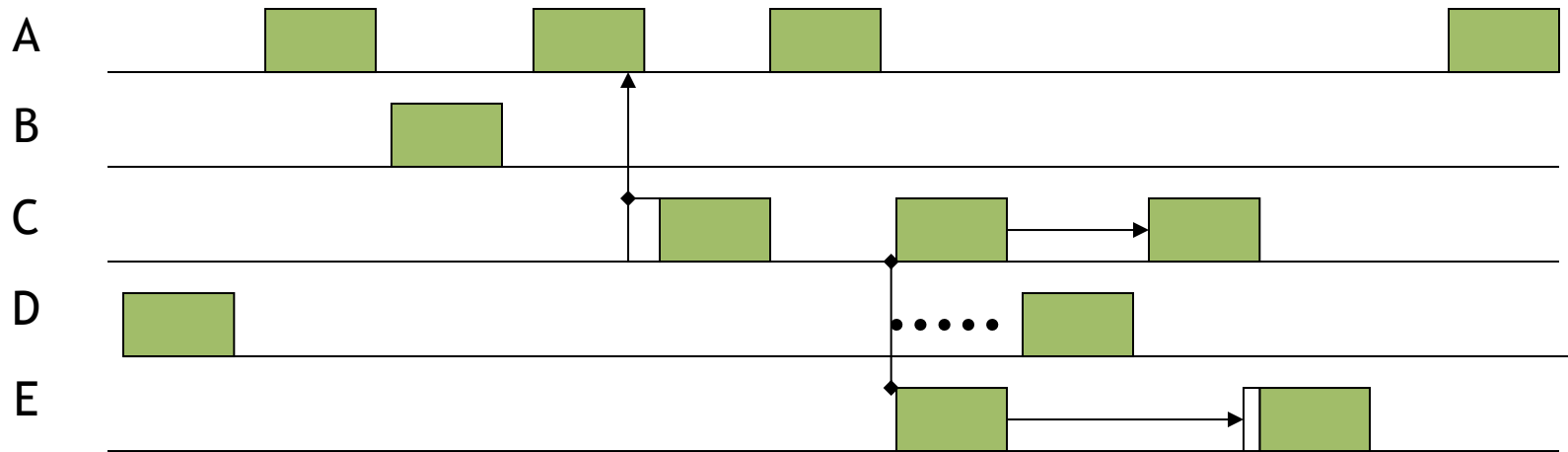
Endereço: MSB = 0 - endereço “unicast” (e.g., D4:BE:D9:04:80:3F)  
 MSB = 1 - endereço de grupo “multicast”  
 todos os bits a 1 - “broadcast”

Estrutura do endereço unicast (**universalmente únicos**):



# IEEE 802.3/Ethernet: Protocolo de Controlo de Acesso ao Meio (1)

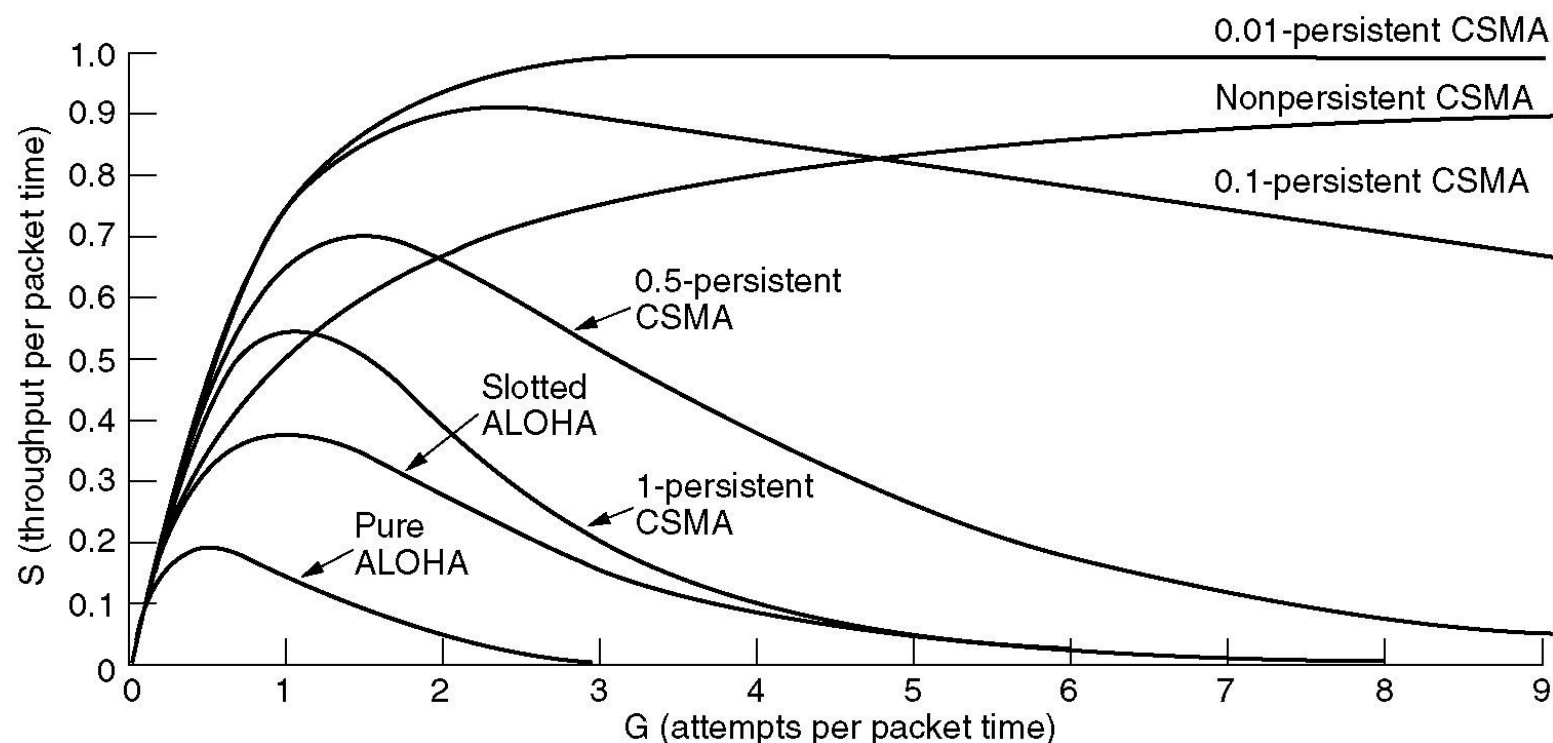
Utilizador



**Carrier Sense Multiple Access (CSMA):** antes de transmitir escuta o canal

- **CSMA 1-persistente:** se ocupado, transmite logo que esteja livre
- **CSMA não-persistente:** se ocupado, espera um tempo aleatório para nova tentativa
- **CSMA  $p$ -persistente:** o tempo é discreto e transmite num slot livre com probabilidade  $p$ , se não transmitir repete o processo até transmitir ou outra estação ganhar o acesso ao canal, nessa altura é gerado um tempo aleatório tal como no caso de colisão

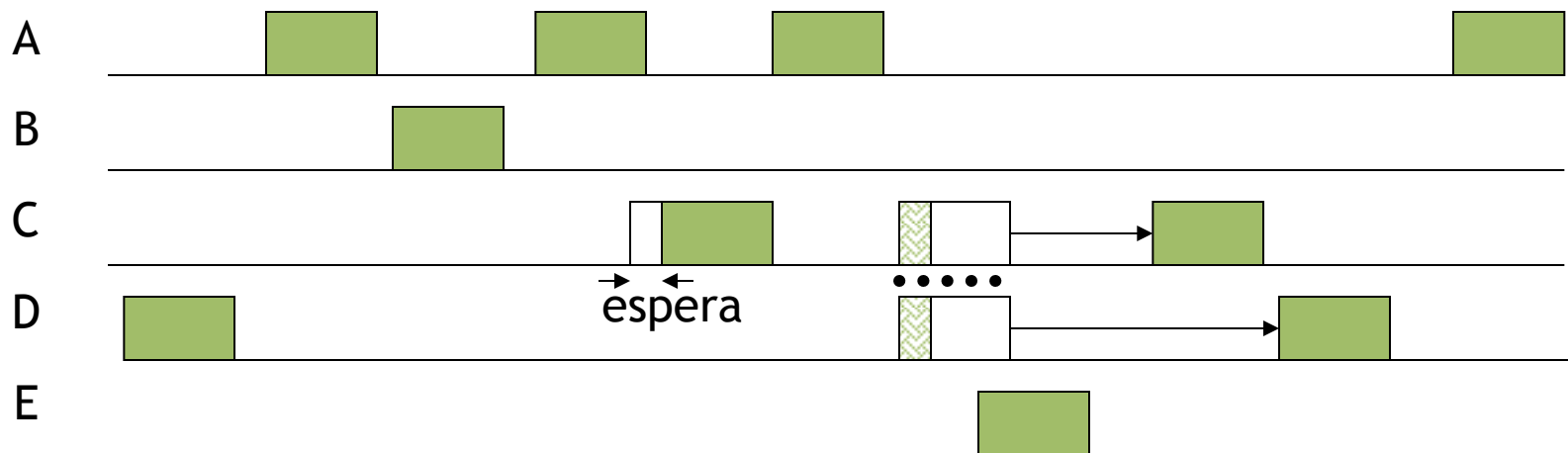
# CSMA: Desempenho



**NOTA:** para tráfego baixo, o CSMA  $p$ -persistente provoca atrasos médios elevados para valores de  $p$  muito baixos.

# CSMA/CD

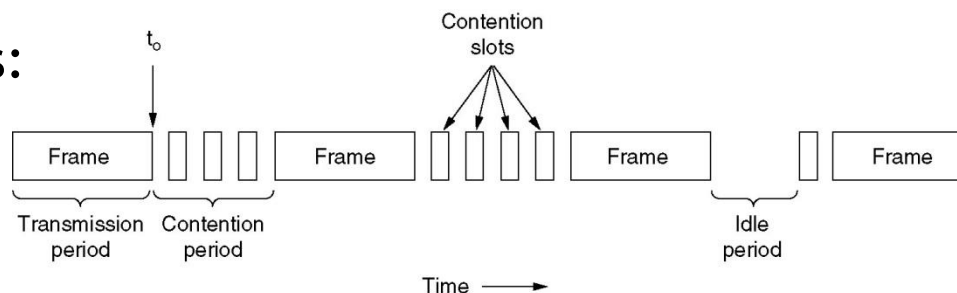
Utilizador



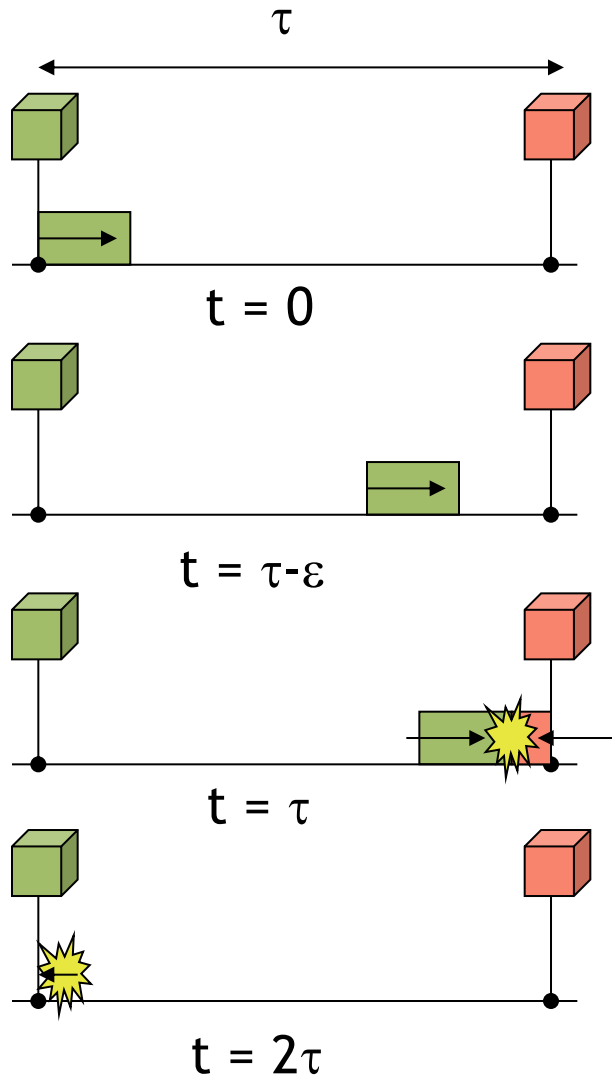
- Interrompe a transmissão mal detecta uma colisão
- Tem que esperar o tempo do sinal percorrer duas vezes a distância entre as duas estações mais afastadas ( $2\tau$ ), e.g., 1 km de cabo  $\Rightarrow \tau \approx 5\mu s$

Três estados possíveis:

1. Contenda
2. Transmissão
3. Inactivo



# IEEE 802.3/Ethernet: Acesso ao Meio



- Para acesso ao meio utiliza-se **CSMA/CD**
- O tempo  $\tau = d/v_p$  corresponde ao tempo de vulnerabilidade da trama.
- A colisão é detectada (CD) por escuta do canal
- Apenas após  $2\tau$  (*slot*) pode, o emissor, ter a certeza que a trama não sofreu colisão
- A detecção de colisões (/CD) implica haver um tamanho mínimo para a trama,  $t_{txl} > 2\tau$ , e a necessidade de bytes de enchimento,

Exemplo (IEEE 802.3/Ethernet 10Base5):

- 2,5 km c/ 4 repetidores, i.e., 5 segmentos a 10 Mbit/s
- Nestas condições  $2\tau = 51,2 \mu s$

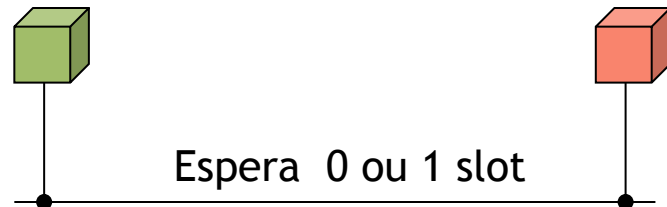
$$L/R_b \geq 2\tau \Rightarrow \mathbf{L_{min} = 512 \text{ bits}}$$



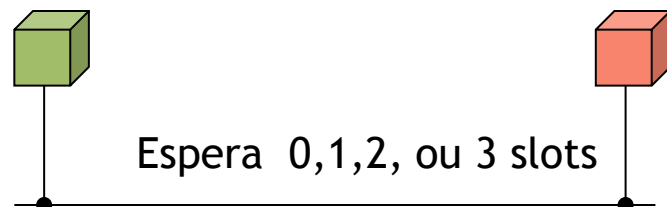
# IEEE 802.3/Ethernet: Resolução de Colisões

## *Binary Exponential Backoff*

Depois da 1ª colisão:

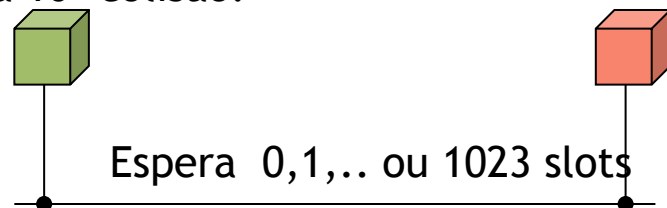


Depois da 2ª colisão:



Depois da  $i$ -ésima colisão: Espera 0, 1, ... ou  $2^i - 1$  slots

Depois da 10ª colisão:



Depois da 16ª colisão desiste

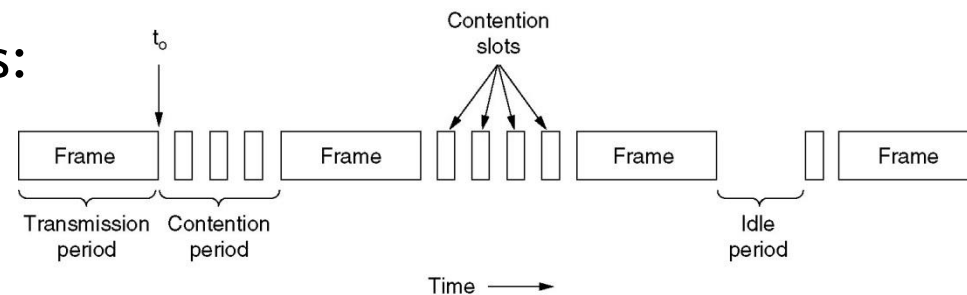
- Tempo de espera para retransmissão tem de ser aleatório.
- Duas escolhas inadequadas:
  - Intervalo de escolha pequeno -> quando a carga é grande a probabilidade da colisão se repetir é elevada
  - Intervalo de escolha grande -> quando a carga é pequena o atraso é desnecessariamente elevado
- Solução - dinâmica e não centralizada: *binary exponential backoff*
  - Usa como indicador da carga no sistema o número de colisões consecutivas
  - Adapta o intervalo de escolha de acordo com esse indicador

# IEEE 802.3/Ethernet: Cálculo do Desempenho

- **Objectivo:** o cálculo do desempenho do sistema,  $S$ , que equivale calcular a taxa de utilização do canal,  $U$

Três estados possíveis:

1. Contenda
2. Transmissão
3. Inactivo



- $U = S = t_{txl} / t_{\text{ciclo entre tramas}}$
- $t_{\text{ciclo entre tramas}} = t_{\text{contenda}} + t_{txl}$
- *Dificuldade: cálculo de  $t_{\text{contenda}}$*

# IEEE 802.3/Ethernet: Desempenho Óptimo (1)

- **Objectivo:** calcular  $t_{\text{contenda}}$ , e depois calcular o  $U_{\text{óptimo}}$
- **Ponto de partida:**  
Prob. de uma entre  $k$  estações transmitir durante um “slot” de contenda:  $p$
- Prob.,  $A$ , de alguma estação adquirir o canal:  $A = kp(1-p)^{k-1}$
- $A$  é máximo para  $p = 1/k$ ,  $\lim_{k \rightarrow +\infty} A = 1/e$
- Prob. de o intervalo de contenda ter exactamente  $j$  slots:  $A(1-A)^j$
- Número médio de slots por contenda:  $\sum_{j=1}^{\infty} j(1-A)^j A = \frac{1-A}{A}$  [=  $(e - 1)$  para  $p$  óptimo]
- Duração de cada slot:  $2\tau$
- Duração média do intervalo de contenda:  $w = 2\tau \frac{1-A}{A}$   
- Para  $p$  óptimo:  $w = 2\tau(e-1) \approx 3,44\tau$
- Taxa de utilização para  $p$  óptimo:  $U = \frac{T_{tx}}{T_{tx} + 2\tau \frac{1-A}{A}} = \frac{1}{1 + 2(e-1) \frac{d}{v_p} \frac{r_b}{L}}$

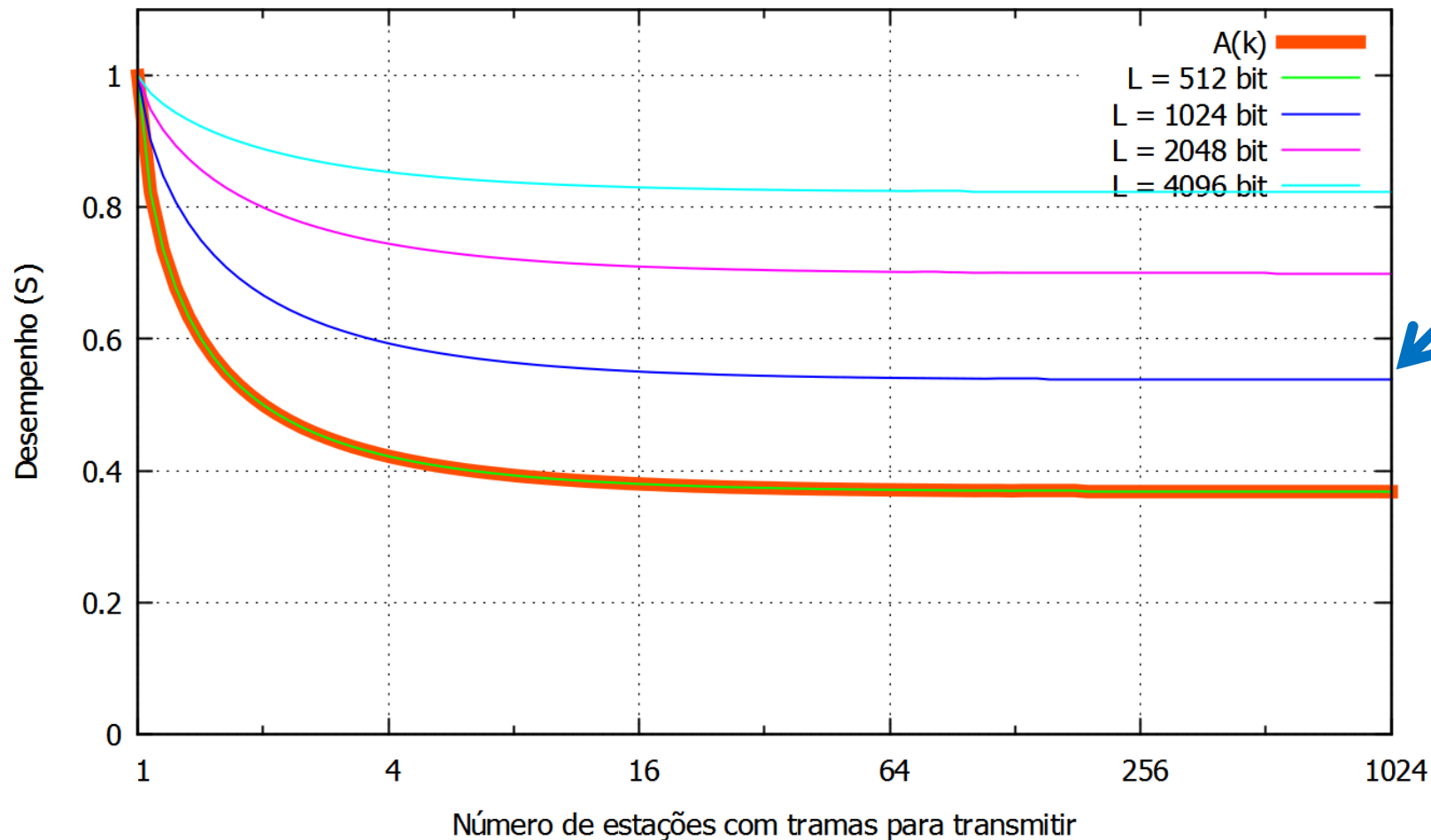
$L$  - comp. da trama  
 $r_b$  - ritmo binário  
 $d$  - comp. do cabo  
 $v_p$  - velocidade de prop.

# IEEE 802.3/Ethernet: Desempenho Óptimo (2)

Para os seguintes valores:

- $2\tau = 51,2 \mu s$
- $L = 1024 \text{ bit (128 bytes)}$
- $R_b = 10 \text{ Mbit/s}$
  
- $T_{tx} = L/R_b = 1024/10 \times 10^6 = 102,4 \mu s$
  
- Número médio de *slots* por contenda:  $N_{Tx} = e - 1 = 1,72$
- Duração média do intervalo de contenda:  $w = (e - 1) \times 2\tau \approx 88 \mu s$
- Taxa de utilização (para  $p$  óptimo):  $U = S \approx 0,54$

# IEEE 802.3/Ethernet: Desempenho óptimo (3)



Taxa de utilização da Ethernet a 10 Mbit/s com *slots* de 512 bits (64 bytes)

# Ethernet Comutada (Switched Ethernet)

**Objectivo:** Aumentar o desempenho para ritmos de transmissão elevados, e.g., 100 Mbit/s, através da diminuição da possibilidade de ocorrência de colisões



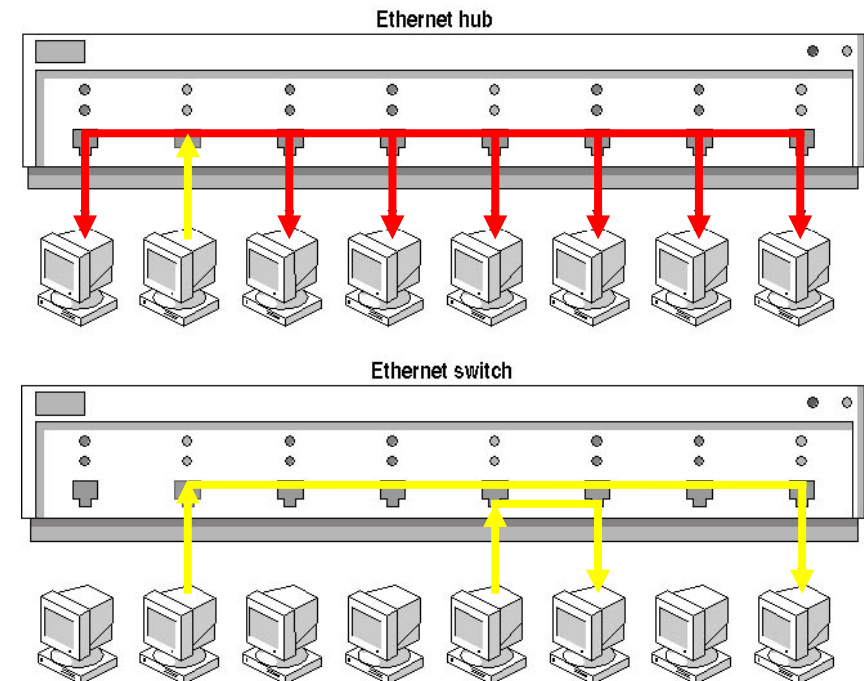
**Switch** - comutador  
**Hub** - concentrador

**Hub (L1)** - Quando uma estação transmite todas as outras recebem (domínio de colisão) -> **Repetição**

**Switch (L2)** - Quando uma estação transmite apenas a estação de destino recebe -> **Comutação**

**Comutação:**

- Requer processamento do cabeçalho das tramas (i.e., endereços) e tabelas de expedição (próximos capítulos)
- Não há colisões, mas há filas de espera que podem originar *overflows*



# Ethernet a 100 Mbit/s (Fast Ethernet)

IEEE 802.3u

- Desenvolvimento a par com a Ethernet comutada
- Estrutura de trama idêntica à norma IEEE 802.3
- Baseada na configuração 10BaseT (utiliza concentradores e comutadores)
- Negociação automática do ritmo óptimo de transmissão (10 ou 100 Mbit/s) e do modo de transmissão (half- ou full-duplex)

Nome	Cabo	Seg. Máximo	Características
100Base-T4	Par entrançado	100 m	UTP categoria 3 (4 pares), half-duplex
100Base-TX	Par entrançado	100 m	UTP categoria 5 (2 pares), full-duplex
100Base-FX	Fibra óptica	2000m	Duas fibras multimodo, full-duplex

# Ethernet a 1 Gbit/s: Gigabit Ethernet (1)

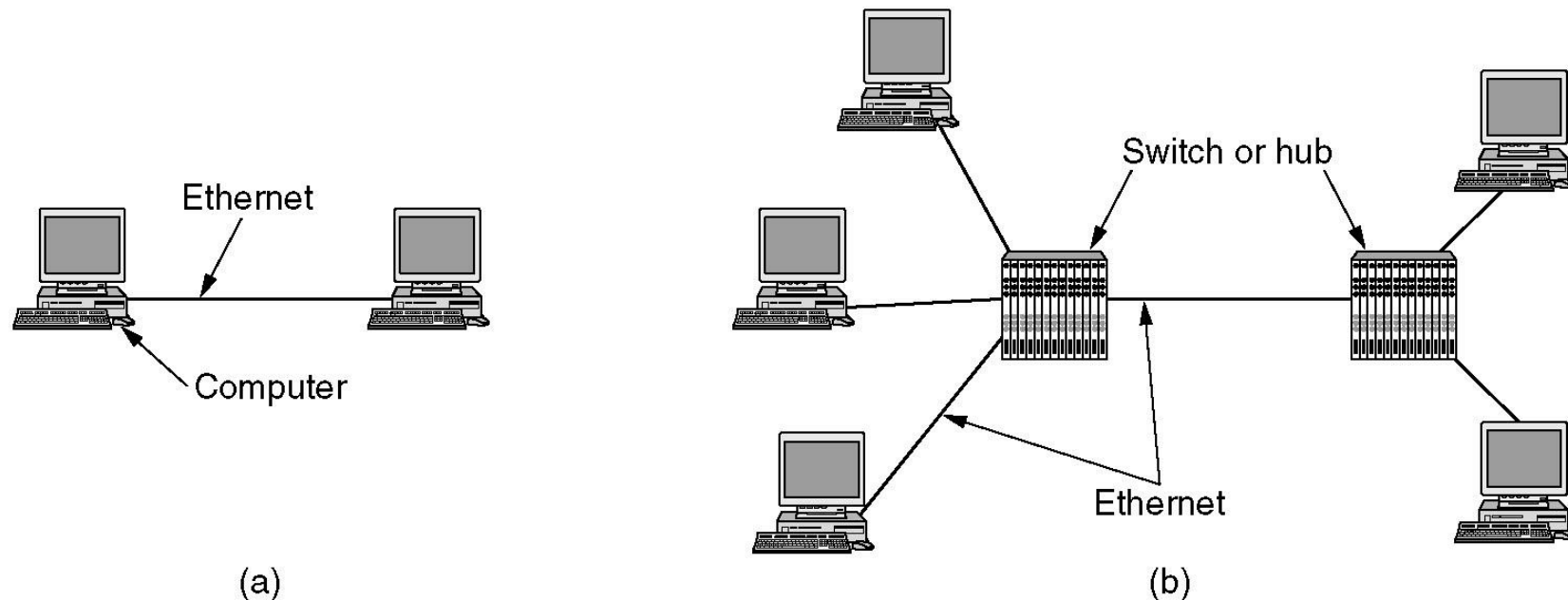
- Estrutura de trama idêntica à norma IEEE 802.3
- Modos de funcionamento:
  - **Full-duplex (modo normal):** sem colisões => não é usado o CSMA/CD; o comprimento máximo do cabo é determinado pela atenuação do sinal e não pelo tempo de propagação; *utiliza comutadores*
  - **Half-duplex:** com colisões => utilização do CSMA/CD; *utiliza concentradores*
- Métodos para aumentar o comprimento máximo da rede (200 m):
  - Aumento do comprimento da trama (enchimento até 512 bytes)
  - Concatenação de tramas

IEEE 802.3z

Nome	Cabo	Seg. Máximo	Características
1000Base-SX	Fibra óptica	550 m	Fibra multimodo (50, 62.5µm)
1000Base-LX	Fibra óptica	5000 m	Fibra monomodo (10 µm)
1000Base-CX	STP (2 pares)	25 m	Pouco usado
1000Base-T	UTP (4 pares)	100 m	UTP cat. 5



# Ethernet a 1 Gbit/s: Gigabit Ethernet (2)



Todas as ligações Gigabit Ethernet são *point-to-point* em vez de *multidrop*

# Versões recentes da Ethernet: 10 GbE

Nome	Cabo	Seg. Máximo	Características
10GBase-SR	Fibra óptica	300 m	Duas fibras multimodo (62.5µm)
10GBase-LR	Fibra óptica	25 km	Duas fibra monomodo (1310 nm)
10GBase-ER	Fibra óptica	40 km	Duas fibra monomodo (1550 nm)
10GBase-LX4	Fibra óptica	10 km 300 m	Duas fibra monomodo/WDM (1310 nm) Duas fibras multimodo (62.5µm)
10GBase-LRM	Fibra óptica	220 m	Duas fibras multimodo (62.5µm)
10GBase-CX4	STP (8 pares)	15 m	Usada em aplicações de interligação para distâncias curtas, e.g., intra-rack
10GBase-T	UTP (4 pares)	100 m	UTP cat. 5 ou UTP cat. 7

- Estrutura de trama idêntica à norma IEEE 802.3
- Não usa CSMA/CD, i.e., apenas modo de funcionamento sem colisões
- Comunicações ponto-a-ponto Full-Duplex
- Comprimento máximo das tramas passa de 1518 para 1522 bytes para suportar o protocolo das Virtual LANs (VLANs) - IEEE 802.1Q
- Uso opcional de tramas “PAUSE” para efectuar controlo de fluxo - receptor envia trama “PAUSE” com indicação da duração da pausa; trama PAUSE com tempo de espera “zero” activa de novo a estação emissora