

# Redes de Computadores 1

**Prof. Miguel Elias Mitre Campista**

`http://www.gta.ufrj.br/~miguel`

# Parte IV

## Camada de Enlace: Ethernet

# Tecnologias de Rede

- Diversas tecnologias com características diferentes
  - Modelo IEEE 802
    - Definidas pela subcamada de acesso ao meio e a camada física
      - Rede pessoal, local ou metropolitana
- Exemplos
  - Ethernet
  - FDDI
  - ATM
  - Entre outros

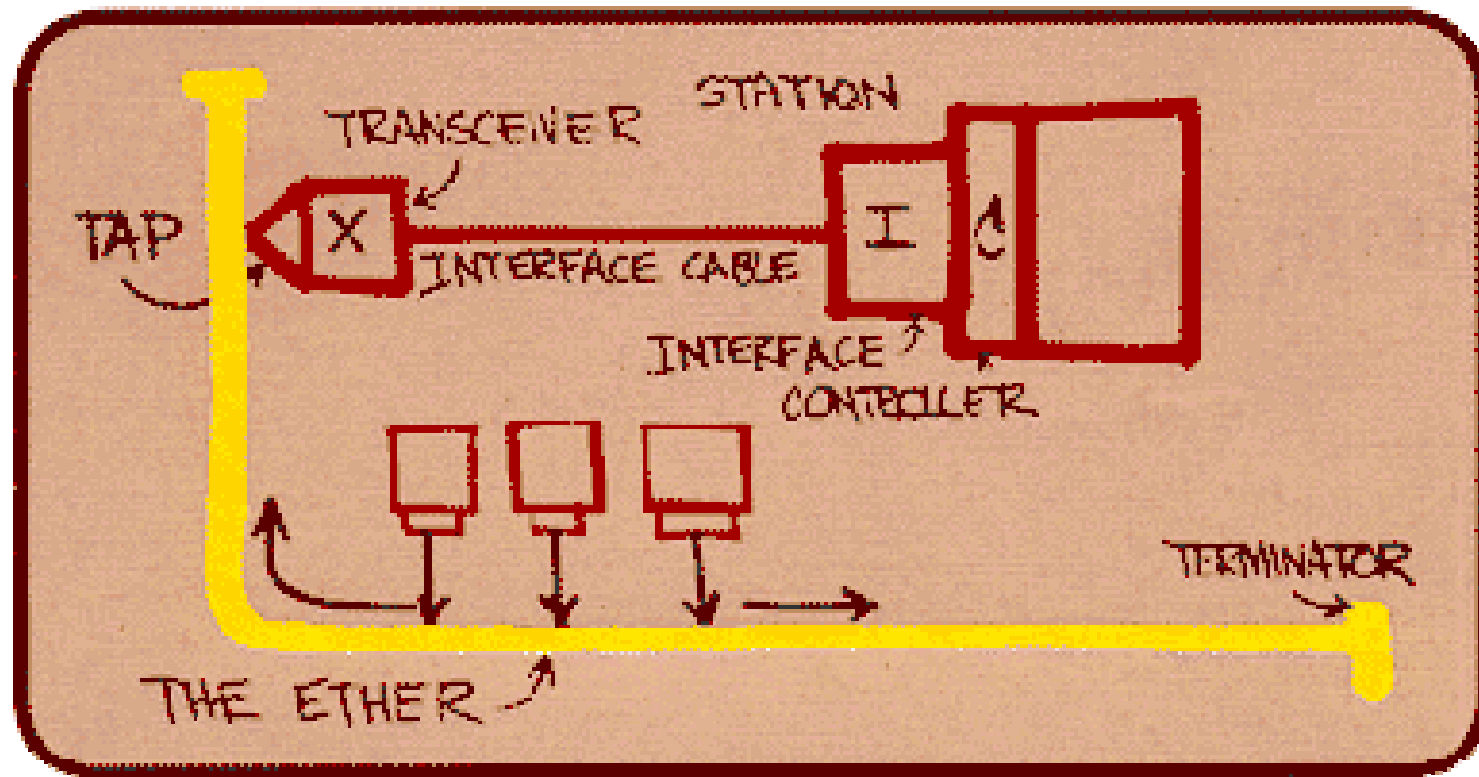
# Ethernet

# Ethernet

- Grande sucesso
  - Muito barata
    - R\$30 para placas 10/100Mbps
  - A primeira tecnologia de rede local a ser disseminada
    - Década de 70
  - Método de acesso eficiente
  - Mais simples e com menor custo quando comparada a redes baseadas em fichas ou ATM
  - Acompanhou o aumento de velocidade das outras tecnologias
    - No início: até 10 Mb/s -- Hoje: até 10 Gb/s

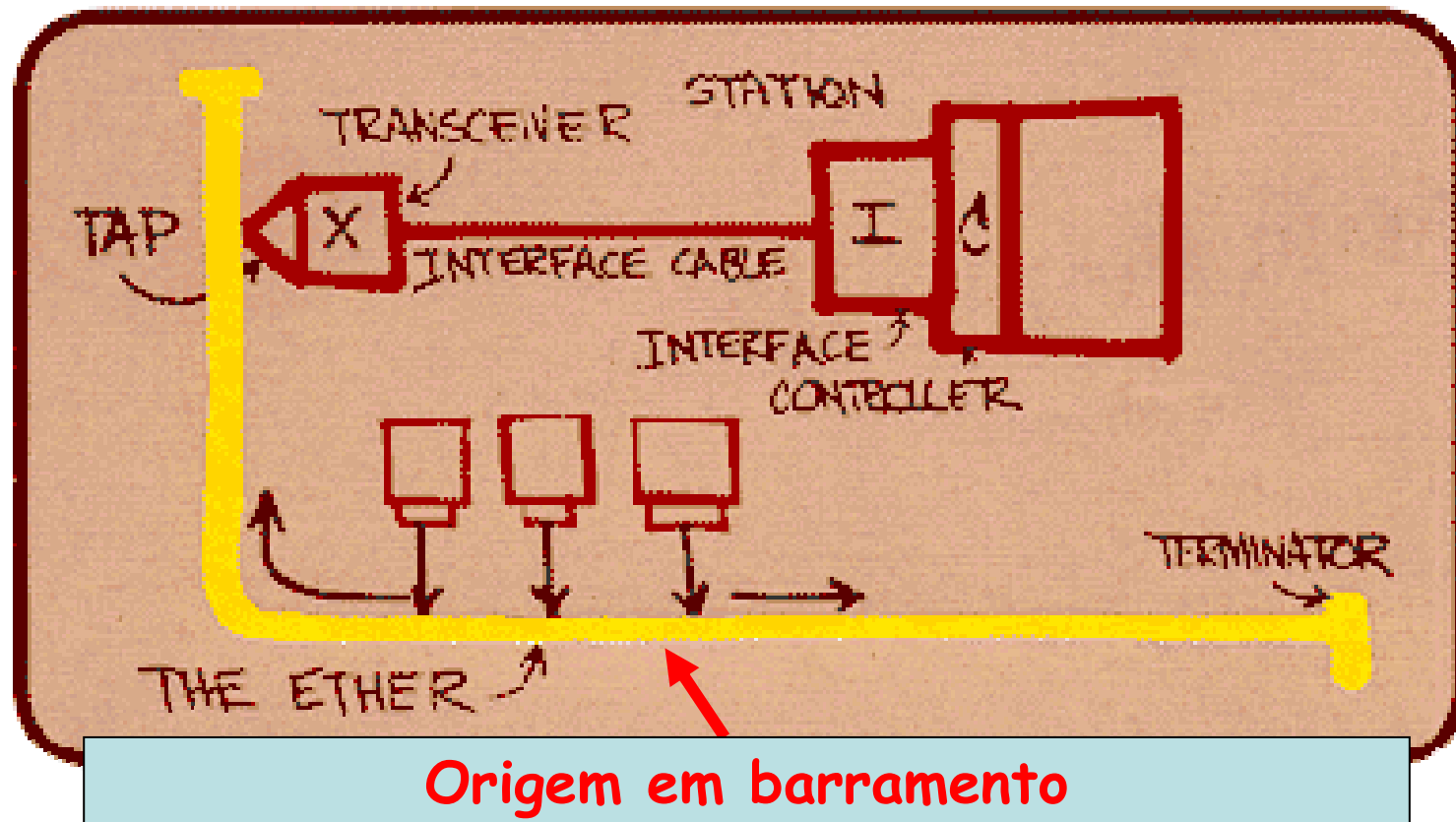
# Ethernet

- Proposta por Bob Metcalf e David Boggs em 1972
  - Funcionários da Xerox



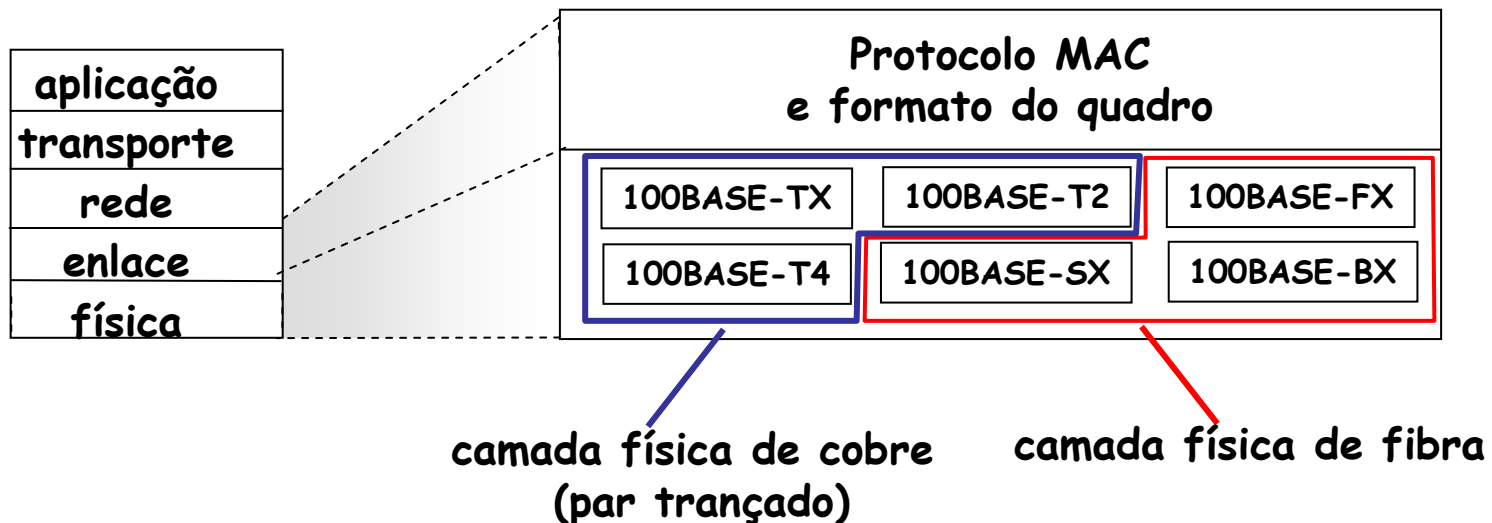
# Ethernet

- Proposta por Bob Metcalf e David Boggs em 1972
  - Funcionários da Xerox



# Ethernet

- Vários tipos se diferenciam na camada física
  - Tipo de cabo, codificação, uso do CSMA/CD ou de comutação
- Todos os tipos descritos na norma IEEE 802.3
  - Exceto o padrão 10 Gigabit Ethernet (IEEE 802.3ae)





# Ethernet

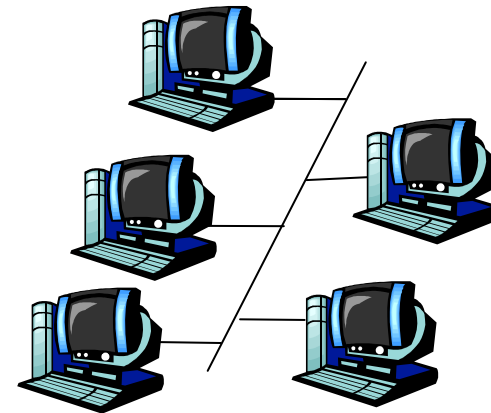
- Vários tipos se diferenciam na camada física
  - Tipo de cabo, codificação, uso do CSMA/CD ou de comutação
- Todos os tipos descritos na norma IEEE 802.3
  - Exceto o padrão 10 Gigabit Ethernet (IEEE 802.3ae)
    - 100Base-TX: Fast Ethernet
    - 100Base-T4 e T2: Versões anteriores ao Fast Ethernet
    - 100Base-FX, SX e BX: Versões do Fast Ethernet que usam fibras ópticas
      - SX e FX usam pares de fibra, enquanto BX usa apenas uma fibra multiplexada em comprimento de onda para transmissão e recepção

# Ethernet: Serviço

- Não orientado à conexão
  - Não há estabelecimento de conexão entre o transmissor e o receptor
- Não confiável
  - Receptor não envia ACKs ou NACKs para o transmissor
    - Fluxo de datagramas passados para a camada de rede pode conter falhas na sequência
      - Falhas são recuperadas se aplicação estiver usando o TCP
      - Caso contrário, a aplicação recebe dados com lacunas

# Rede Ethernet Original (10 Mb/s)

- Topologia em barramento compartilhado entre as estações
  - Todos os nós no mesmo **domínio de colisão**
    - **Quadros de fontes diferentes podem colidir**
- Operação em *half-duplex*
- Método de acesso é o CSMA/CD

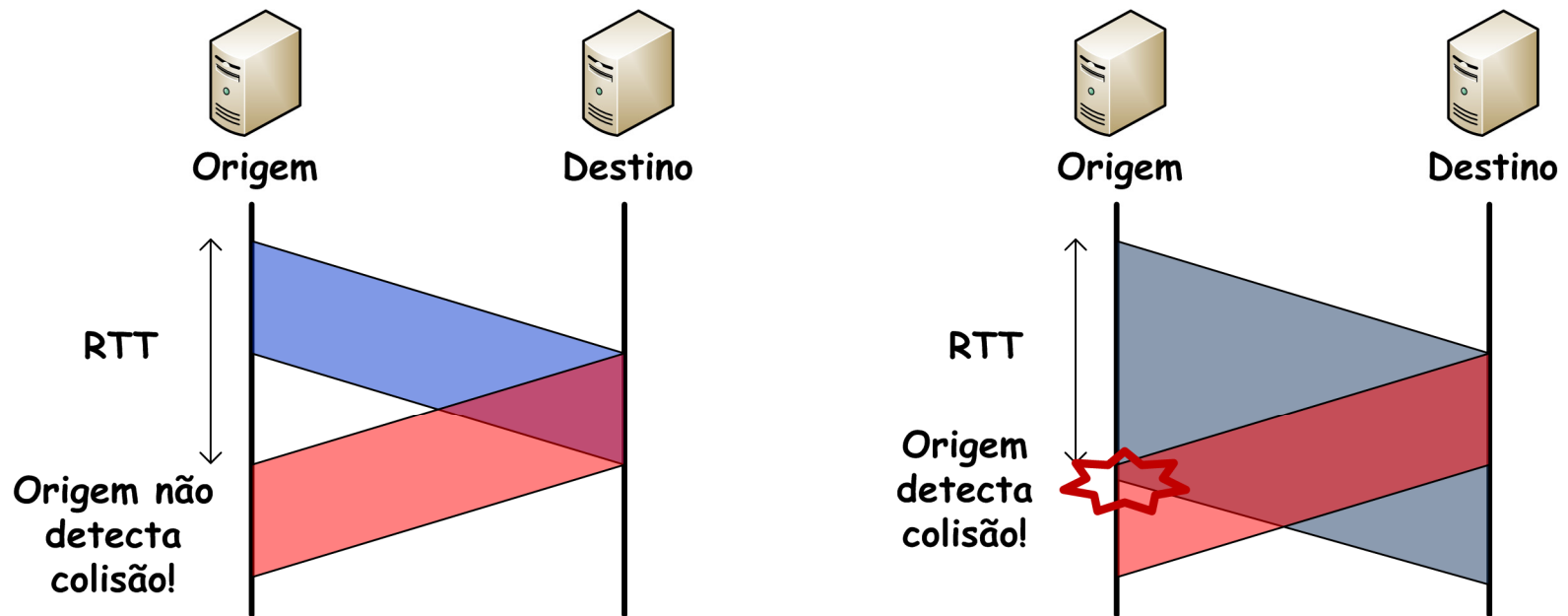


**barramento: cabo coaxial**

# Rede Ethernet Original (10 Mb/s)

- Quadro Ethernet possui um tamanho mínimo
  - Garantir a detecção de colisão
- Tempo máximo entre o início de transmissão de um quadro e a recepção do primeiro bit de uma mensagem de *jam*...
  - É duas vezes o tempo de propagação de uma extremidade a outra do cabo
    - RTT (tempo de ida-e-volta)

# Rede Ethernet Original (10 Mb/s)



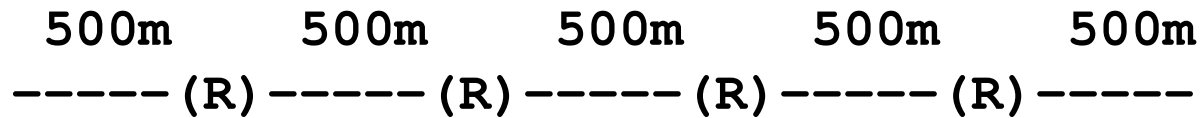
# Rede Ethernet Original (10 Mb/s)

- Quadro Ethernet possui um tamanho mínimo
  - Garantir a detecção de colisão
- De acordo com o IEEE 802.3
  - LAN a 10 Mb/s, 2500 m,  $2 \times 10^8$  m/s
    - *RTT (Round-Trip Time) máximo =  $2\tau = 50 \mu\text{s}$*
  - 1 bit = 100 ns
    - *Então, quadro mínimo =  $50 \mu\text{s} / 100 \text{ ns} = 500$  bits*
  - IEEE 802.3: ~512 bits ou **64 bytes**

# Rede Ethernet Original (10 Mb/s)

- Cálculo do tamanho mínimo do quadro Ethernet
  - Para o 10Base5  $\rightarrow$  10 Mb/s
    - Tempo para envio de um bit  $\rightarrow t_{\text{bit}} = 1/10^7 = 100 \text{ ns}$
  - Velocidade de propagação no meio:  $v_{\text{prop}} = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$
  - Cada segmento Ethernet nessa especificação tem no máximo 500 m
    - Logo:  $T_{\text{prop}} = 2,5 \mu\text{s}$
- Pela norma, com o uso de repetidores é possível unir 5 segmentos de 500m  $\rightarrow$  2500 m
- Cada repetidor introduz um atraso, na época da especificação, de aproximadamente  $3 \mu\text{s}$

# Rede Ethernet Original (10 Mb/s)



- Logo
  - $RTT = 2 * (2,5 + 3 + 2,5 + 3 + 2,5 + 3 + 2,5 + 3 + 2,5) = 49 \text{ us} \rightarrow 50 \text{ } \mu\text{s}$ 
    - Valor mais próximo do real é 46,4  $\mu\text{s}$
- Para garantir a detecção de colisão o meio deve estar ocupado por pelo menos RTT, logo o tamanho mínimo de quadro é dado por:
  - $\text{tam}_{\text{quadro}} = RTT / t_{\text{bit}} = 50 \times 10^{-6} / 100 \times 10^{-9} = 500 \text{ bits} \rightarrow 512 \text{ bits} = 64 \text{ bytes}$



# Algoritmo de *Backoff* Exponencial Binário

- Objetivo:
  - Adaptar as tentativas de retransmissão à carga atual estimada
    - *Alta carga → espera aleatória será mais longa*

# Algoritmo de *Backoff* Exponencial Binário

- No caso da detecção de uma colisão
  - Estação interrompe a transmissão
  - Estação envia um sinal de reforço de colisão (*jam*)
    - É necessário, pois nem sempre o número de bits do quadro interrompido é suficiente para a detecção de colisão
    - Tamanho igual a 48 bits (Tamanho mínimo - RTT = 512 - 464bits = 48bits)
      - Garante que o *jam* é recebido antes do fim da transmissão

# Algoritmo de *Backoff* Exponencial Binário

- No caso da detecção de uma colisão (cont.)
  - Estação retransmite o quadro após um tempo aleatório
    - Tempo é dado por um número aleatório ( $n$ ) que multiplica o tempo de *slot* ( $51,2 \mu s$ )
      - Tempo de *slot* correspondente a  $2\tau$ 
        - » Suficiente para 512 bits no Ethernet
    - $n$  entre 0 e  $2^i - 1$ , onde  $i$  é o número de colisões
      - Após 10 colisões
        - » Intervalo aleatório congelado em 1023 *slots*
      - Após 16 colisões
        - » Quadro é descartado
        - » Falha é reportada para a camada superior

# Ethernet: CSMA/CD

1. Adaptador recebe datagrama da camada de rede e cria um quadro
2. Se o adaptador percebe que o canal está ocioso, começa a transmitir o quadro. Se percebe que o canal está ocupado, espera que o canal fique livre e transmite
3. Se o adaptador transmitir todo o quadro sem detectar outra transmissão, o adaptador concluiu a operação com o quadro
  - Não houve colisão!

# Ethernet: CSMA/CD

4. Se o adaptador detectar outra transmissão enquanto estiver transmitindo, aborta e envia sinal de reforço de colisão (*jam*) de 48 bits
5. Após interromper a transmissão, o adaptador entra em *backoff* exponencial binário
  - Após a  $m$ -ésima colisão, o adaptador escolhe um  $K$  aleatoriamente entre  $\{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\}$ . O adaptador espera  $512 * K$  tempos de bit e retorna ao Passo 2

# Eficiência do CSMA/CD

- $L$  = comprimento do quadro
- $R$  = taxa de transmissão
- $t_{\text{prop}}$  = atraso máximo de propagação entre 2 nós na LAN
- $t_{\text{trans}}$  = tempo para transmitir quadro de  $L$   
-  $t_{\text{trans}} = L/R$
- backoff = backoff médio, pode ser calculado em função de  $t_{\text{prop}}$

$$\text{eficiência} = \frac{L/R}{L/R + t_{\text{prop}} + \text{backoff}} = \frac{1}{1 + 5t_{\text{prop}}/t_{\text{trans}}}$$

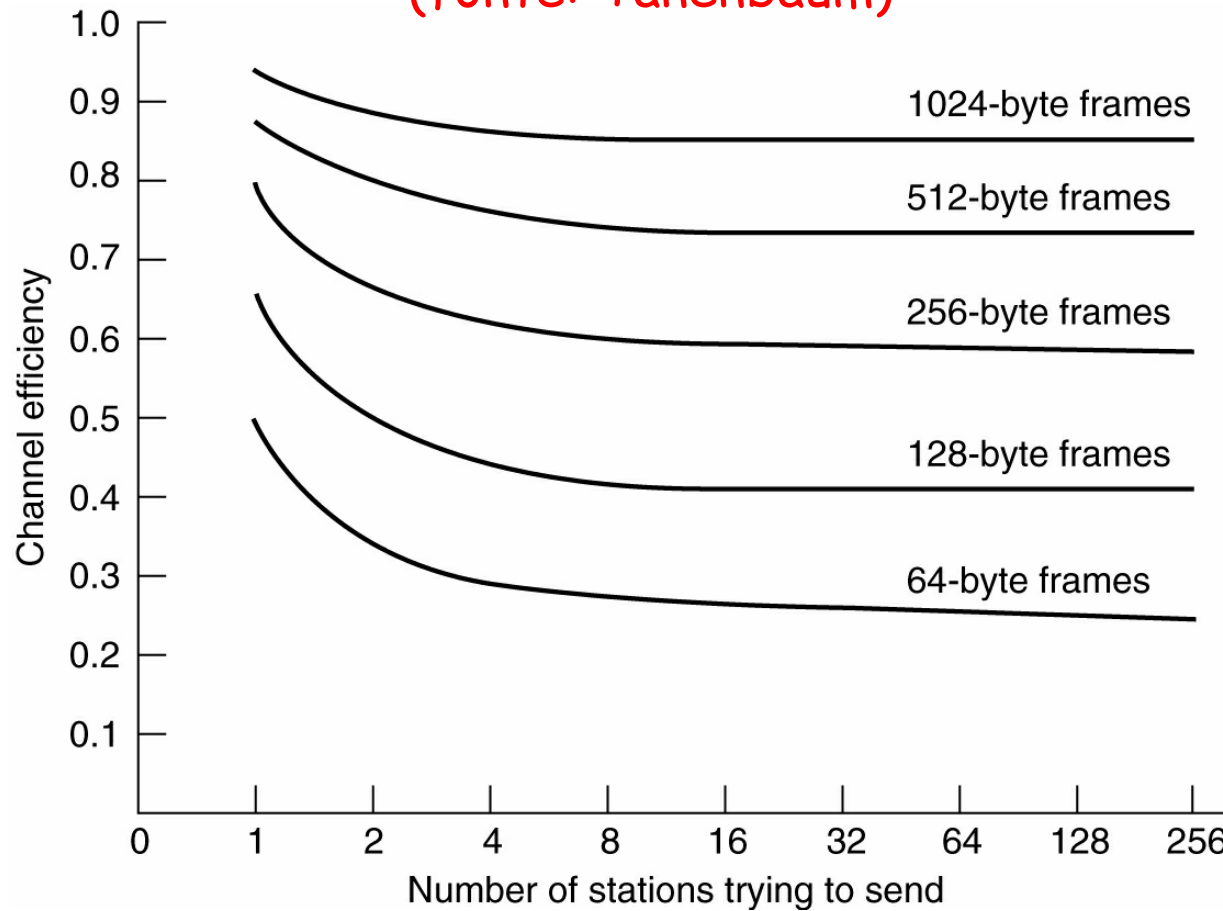
# Eficiência do CSMA/CD

- Eficiência vai para 1 à medida que:
  - $t_{prop}$  vai para 0
  - $t_{trans}$  vai para infinito
- Muito melhor do que ALOHA, e ainda é descentralizado, simples, e barato!

$$\text{eficiência} = \frac{L/R}{L/R + t_{prop} + \text{backoff}} = \frac{1}{1 + 5t_{prop}/t_{trans}}$$

# Eficiência do Ethernet

Eficiência do Ethernet a 10 Mb/s e tempo de *slot* de 512 bits  
(fonte: Tanenbaum)





# Quadro Ethernet Original

- Preâmbulo
  - Sincronização entre relógios
  - 7 bytes 10101010 e o último byte 10101011
    - Espécie de delimitador de início de quadro
  - Codificação Manchester produz uma onda quadrada de 10 MHz durante aproximadamente 6,4  $\mu$ s
- Endereços de destino e de origem
  - 6 bytes cada



# Quadro Ethernet Original - Endereços

- IEEE controla parte do endereço
  - Identificadores únicos de organização (*Organizationally Unique Identifiers* - OUI)
    - Primeiros 3 bytes (24 bits)
- Fabricante define os outros 3 bytes
  - Antes de vender a interface de rede
- Bit mais significativo igual a 1
  - *Multicast* ou difusão
- Todos os bits em um
  - Difusão

# Quadro Ethernet Original

- Endereços de destino e origem
  - O adaptador recebe um quadro com endereço de destino igual ao seu ou com endereço de broadcast (ex. pacote ARP de *request*)
    - Passa os dados do quadro para o protocolo da camada de rede
  - Caso contrário
    - O adaptador descarta o quadro



# Quadro Ethernet Original

- Tipo
  - Protocolo usado pela camada superior
- Dados
  - Tamanho mínimo de 46 bytes
    - Quadro de 64 bytes garante a detecção de colisão
      - 64 bytes = dados + cabeçalho
  - Tamanho máximo de 1500 bytes
    - *Maximum Transfer Unit (MTU)*



# Quadro Ethernet Original

- Dados (cont.)
  - Dados passados para a camada de rede incluem o enchimento (se existente)
    - Tamanho do pacote da camada rede fará com que os dados sejam separados do enchimento
- CRC
  - 32 bits
    - $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x^1 + 1$



# Quadro Ethernet Original

- Não há delimitador de fim de quadro
  - Delimitação indicada pela ausência de bits



# Rede Ethernet Original

- Camada física
  - Cabeamento
  - Codificação

# Rede Ethernet Original

- Tipos de cabeamentos (802.3)
  - Nomenclatura
    - $\langle x \rangle \langle \text{sinal} \rangle \langle y \rangle$ 
      - $x$  é a taxa de transmissão em Mb/s
      - sinal é o tipo de sinalização usada
      - $y$  é o comprimento máximo do cabo coaxial / 100 em metros ou o tipo de meio físico

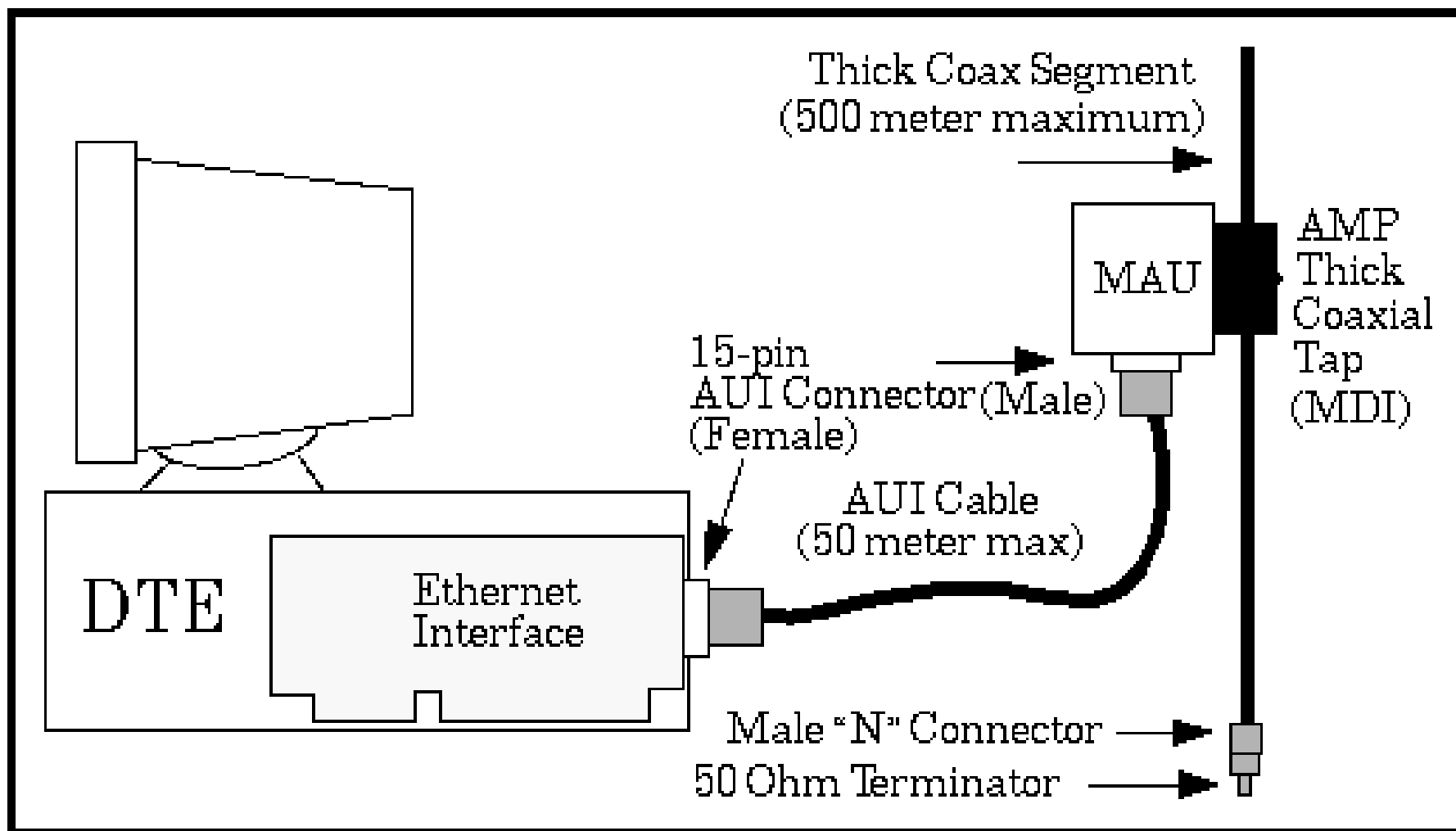


# Tipos de Cabeamentos

- 10Base5 (Ethernet grossa): Normalizada em 1980
  - Banda base
  - Topologia em barramento
  - Taxa de transmissão de 10 Mb/s
  - Segmento de até 500 m
  - Máximo de cinco segmentos
  - Máximo de 100 estações por segmento
  - Cabo coaxial de 1 cm de diâmetro
  - Custo alto dos cabos e conectores
  - Pouca flexibilidade do cabo

**AUI: Attachment Unit Interface**  
**MAU: Medium Attachment Unit**  
**AMP: Access Module Processor**  
**MDI: Medium Dependent Interface**

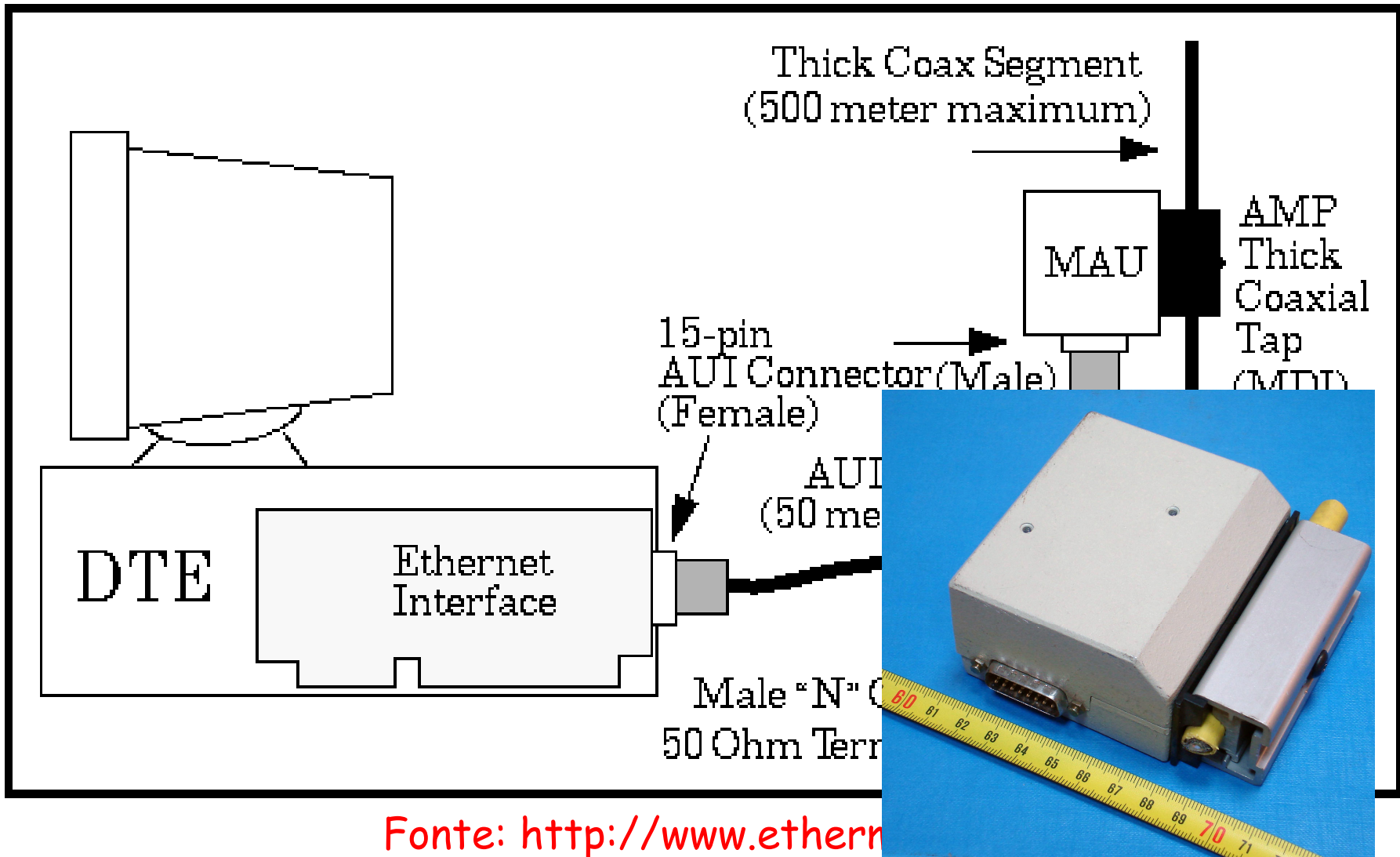
# 10Base5



Fonte: <http://www.ethermanage.com/>

**AUI: Attachment Unit Interface**  
**MAU: Medium Attachment Unit**  
**AMP: Access Module Processor**  
**MDI: Medium Dependent Interface**

# 10Base5

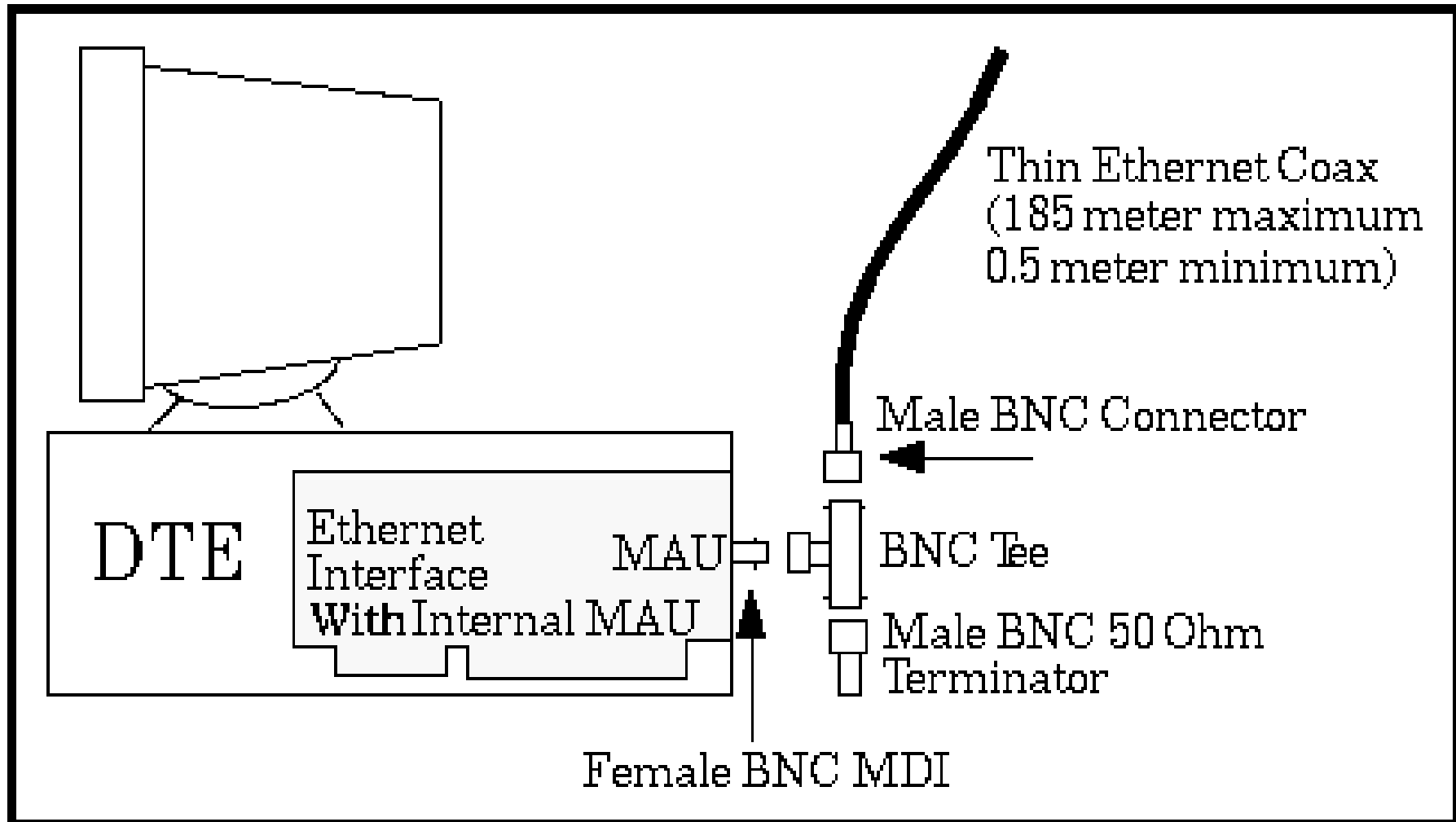


Fonte: <http://www.ethern>

# Tipos de Cabeamentos

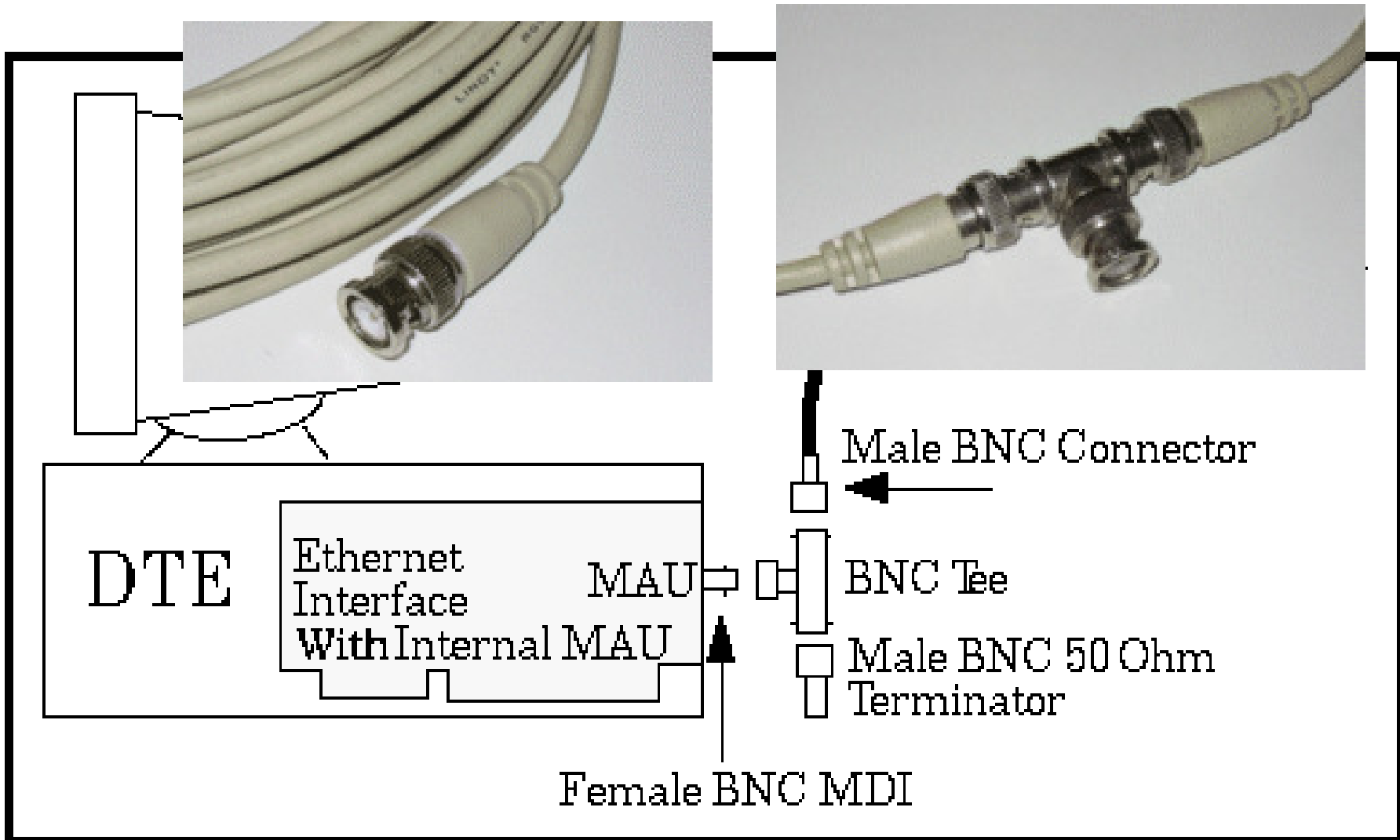
- 10Base2 (Ethernet fina): Normalizada em 1987
  - Banda base
  - Topologia em barramento
  - Taxa de transmissão de 10 Mb/s
  - Segmento de até 185 m (~200 m)
  - Máximo de cinco segmentos
  - Máximo de 30 estações por segmento
  - Cabo de 0,5 cm de diâmetro
  - Conectores BNC padrão
  
  - Problema de identificação de cabos partidos

# 10Base2



Fonte: <http://www.ethermanage.com/>

# 10Base2

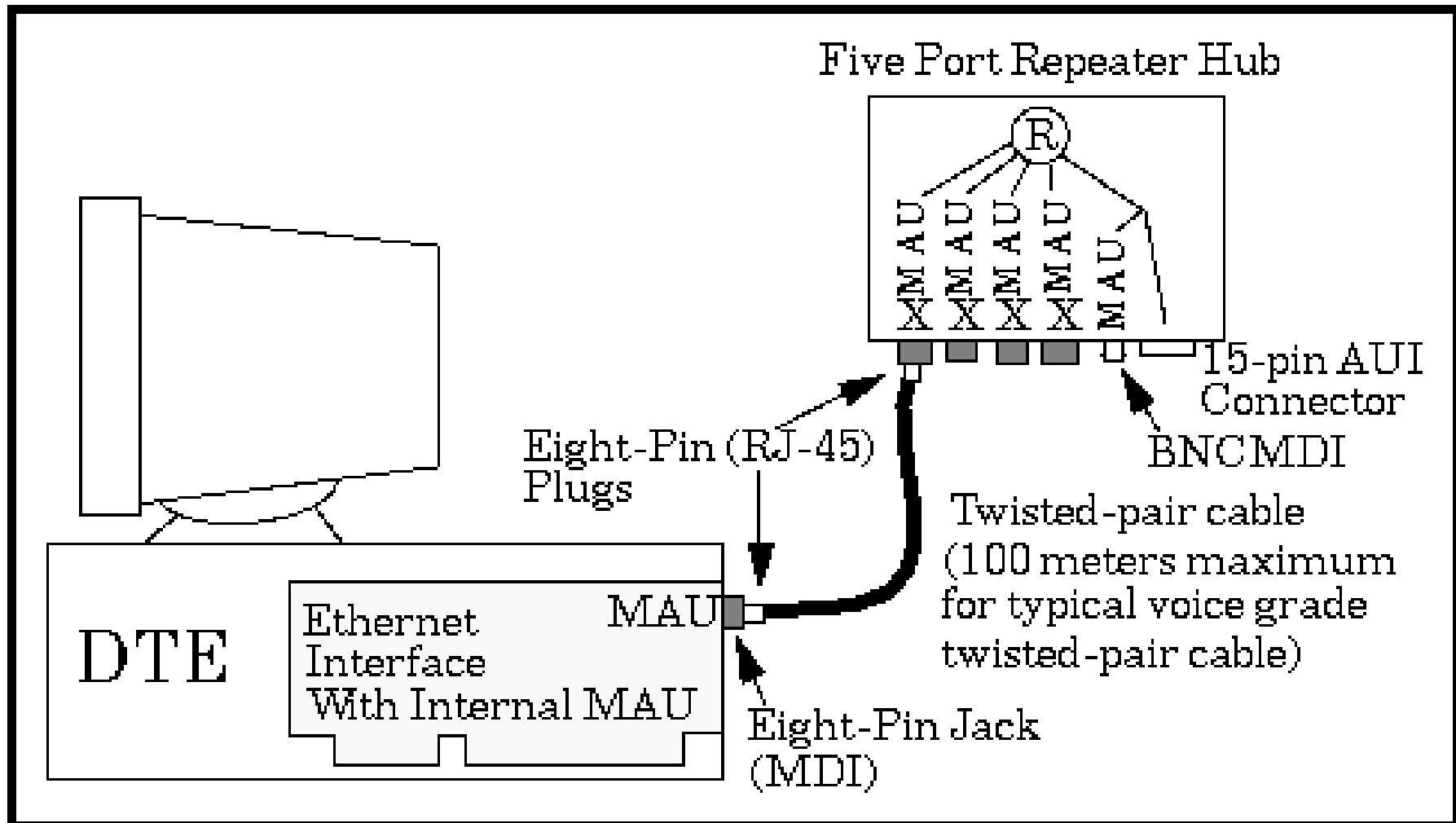


Fonte: <http://www.ethermanage.com/>

# Tipos de Cabeamentos

- 10Base-T: Normalizada em 1990
  - T → par trançado (*twisted*) como meio de transmissão
  - Taxa de transmissão de 10 Mb/s
  - Estação conectada a um hub através de dois pares trançados
  - Topologia em estrela
  - Topologia lógica em barramento
  - Alcance de 100 a 200 m (do hub a uma estação)
    - **Depende da qualidade do cabo**
  - Número máximo de estações por segmento é 1024

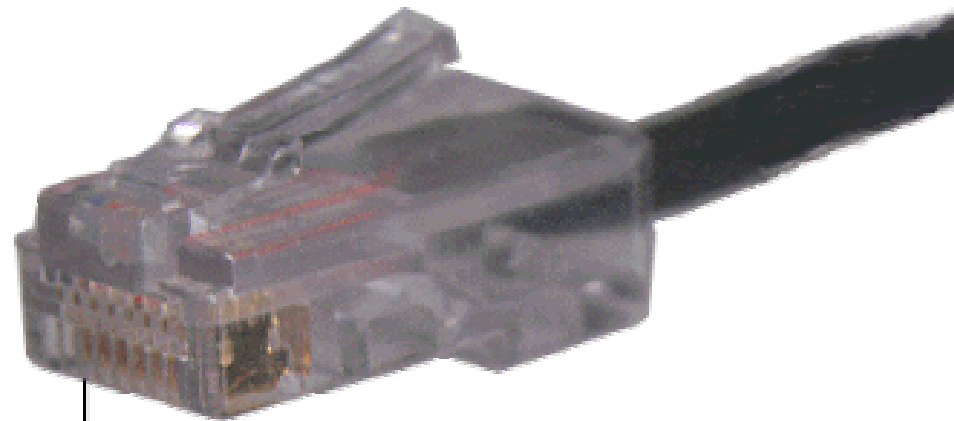
# 10BaseT



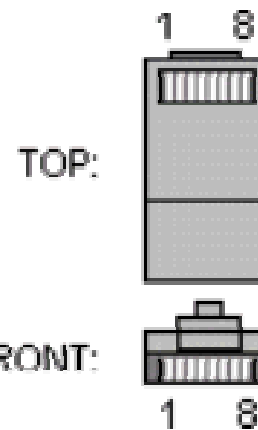
Fonte: <http://www.ethermanage.com/>



# Conector RJ 45

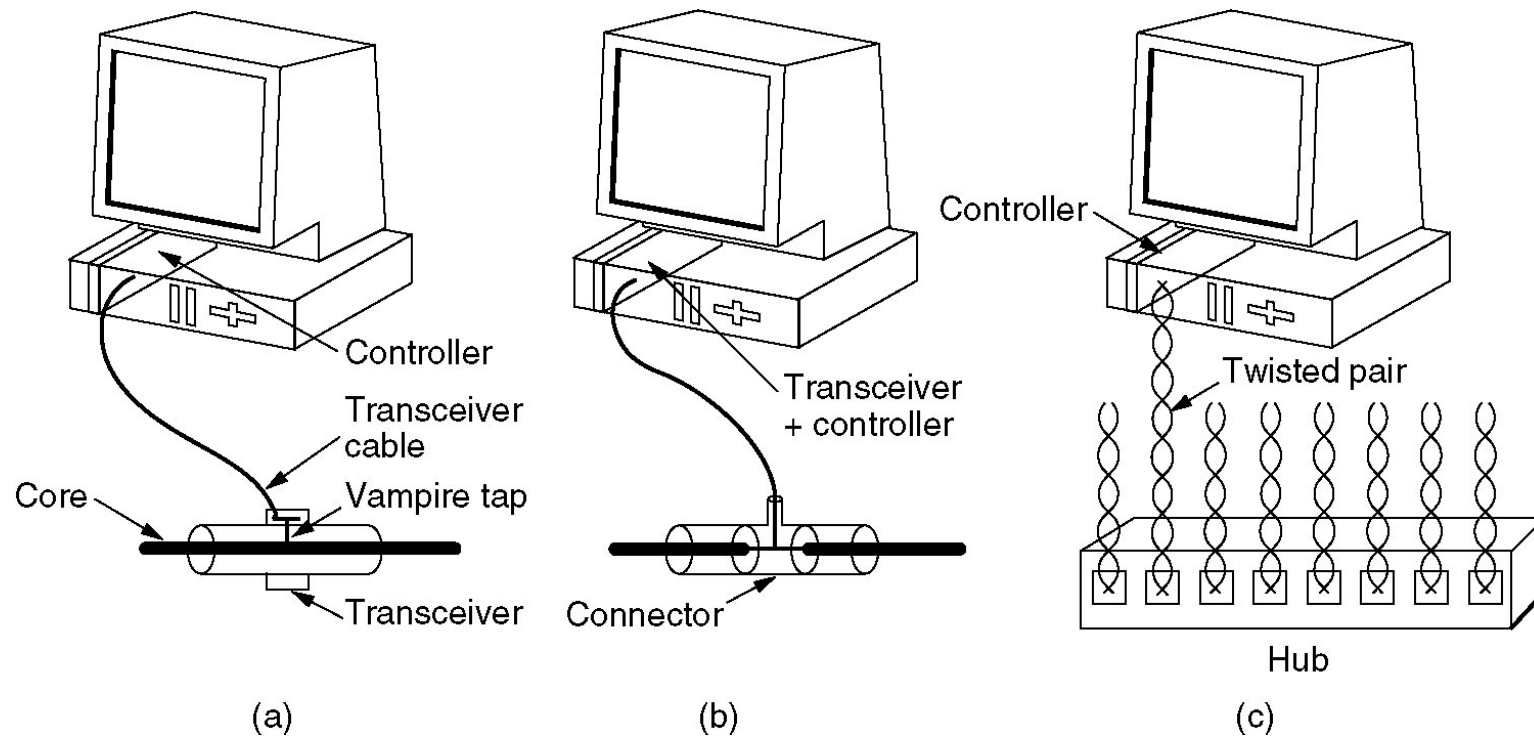


**Pin 1**



# Tipos de Cabeamentos

(a) 10Base5, (b) 10Base2 e (c) 10Base-T (fonte: Tanenbaum)



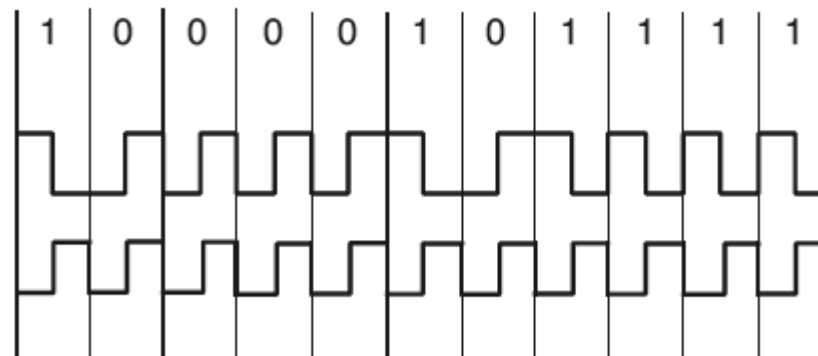
# Tipos de Cabeamentos

- 10Base-F
  - Utiliza fibra óptica
  - Possui excelente imunidade a ruído
  - Segmentos de até 2 km
  - Número máximo de estações por segmento é 1024
  - Alternativa cara em função do custo dos conectores e dos terminadores

# Codificação da Rede Ethernet Original

- Não usa codificação binária direta
  - Problemas de temporização (perda de sincronismo)
- Uso de codificação Manchester
  - Determina-se o início e o fim de cada bit sem o uso de um relógio externo → **transição**

(a) Fluxo de bits



(d) Manchester

(Clock com XOR nos bits)

# Rede Ethernet de Alta Velocidade

- Década de 90...
    - Sucesso do padrão Ethernet
- +
- Evolução da capacidade de processamento dos microcomputadores



**Aumento da taxa de transmissão**

# Rede Ethernet de Alta Velocidade

- Década de 90...
  - Sucesso do padrão Ethernet
  - +  
- Evolução da capacidade de processamento dos microcomputadores



**Aumento da taxa de transmissão**

**Mas como?**

# Rede Ethernet de Alta Velocidade

- Com cabo coaxial, duas soluções poderiam existir:
  1.  $51,2 \mu\text{s}$  a  $100 \text{ Mb/s} \rightarrow 5120 \text{ bits}$ 
    - Aumenta-se o tamanho mínimo do quadro para 5120 bits
      - Pode comprometer o desempenho de algumas aplicações (p.ex. fazendo retransmissões de quadros maiores)
  2. Tempo de detecção de  $5,12 \mu\text{s}$ 
    - Divide-se por 10 os tamanhos máximos dos cabos
      - Também não é uma boa solução, pois a quantidade de nós conectados na rede seria limitada
    - Não se usa coaxial na Ethernet de mais de  $10 \text{ Mb/s}$
- Solução  $\rightarrow$  usar **elementos centralizadores**

# Rede Ethernet de Alta Velocidade

- Hub
  - Transmissão em *half-duplex*
  - Somente repete os dados
    - Não executa o CSMA/CD
      - Estações executam CSMA/CD
      - Encaminha *jams*
  - Não é escalável
    - Um único domínio de colisão

Permite taxas mais elevadas, pois pode reduzir as distâncias entre as estações. Em compensação, ainda não resolve o problema da escalabilidade

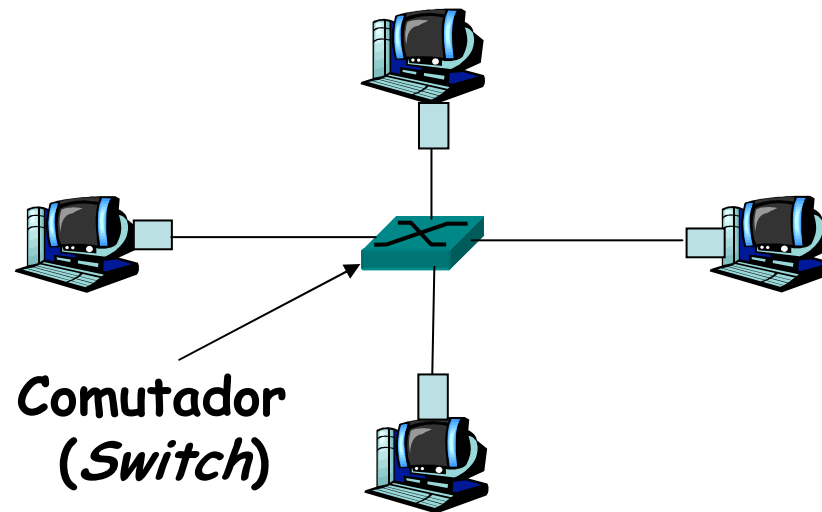


# Rede Ethernet de Alta Velocidade

- Comutador (Acesso dedicado, a estação está ligada diretamente)
  - Transmissão em *full-duplex*
  - Processa, armazena e transmite os dados
  - Pares trançados não são compartilhados → não há colisões
    - Cada porta executa o protocolo Ethernet separadamente
  - Escalável
  - Aumento de eficiência da rede
  - Limitação passa a ser dada pela banda do meio físico ou pela capacidade de comutação

# Rede Ethernet de Alta Velocidade

- Comutador (Acesso dedicado, a estação está ligada diretamente)
  - Topologia em estrela



Topologia em estrela

# Fast Ethernet (100 Mb/s)

- Primeira evolução: Normalizada em 1995
  - Usa par trançado ou fibra óptica como meio
  - Mantêm o formato e os tamanhos mínimo e máximo do quadro
    - **Compatibilidade com o Ethernet legado**
  - Funciona nos modos *half-duplex* e *full-duplex*

# Fast Ethernet com Par Trançado

- 10Base-T
  - UTP cat 3 → sinais de 25 MHz
- Fast Ethernet
  - *Half-duplex*
    - Tamanho máximo da rede deveria ser de 250 m
      - Limitação vem do tamanho máximo do cabo (100 m)
        - » Alcance de 200 m
  - *Full-duplex*
    - Limitação vem do tamanho máximo do cabo (100 m)
      - » Alcance de 200 m

# Fast Ethernet com Par Trançado

- 100Base-T4
  - Pode usar UTP cat 3
  - Usa quatro pares por estação (um para transmissão, um para recepção e os outros dois intercambiáveis)
    - *Não funciona em full-duplex*
  - Usa uma codificação ternária em cada um dos três pares usados para transmissão
    - *Codificação 8B/6T*
  - Transmite-se quatro bits com redundância a 25 MHz

# Fast Ethernet com Par Trançado

- 100Base-TX
  - UTP cat 5 → sinais de 125 MHz a 100 m
    - Usa dois pares (um para transmissão e outro para recepção)
      - Operação pode ser *full-duplex* com taxa de 100 Mb/s em cada direção
    - Não usa codificação Manchester pois exigiria 200 MHz de banda
      - Ao invés disso, usa codificação 4B/5B

# Fast Ethernet com Par Trançado

- Esquema de autonegociação
  - Selecciona
    - Velocidade de operação
      - 10 ou 100 Mb/s
    - Modo de operação
      - *Half* ou *full-duplex*

Comutadores podem operar com estações em versões mais antigas do Ethernet. Nesse caso, a negociação seria usada para garantir a compatibilidade.

# Fast Ethernet com Fibra Óptica

- 100Base-FX
  - Usa dois filamentos de fibra multimodo
    - Um para cada sentido → Operação *full-duplex*
  - Possui distância máxima estação-comutador até:
    - 2 km



# Gigabit Ethernet (1 Gb/s)

- Normalizada em 1998
- Usa par trançado ou fibra óptica como meio
- Mantêm o formato do quadro
  - Tamanhos mínimo e máximo são seguidos
- Funciona nos modos *half-duplex* e *full-duplex*
  - Modo normal é o *full-duplex*

# Gigabit Ethernet com Par Trançado: Modo *Half-duplex*

- Usado quando estações são conectadas a um *hub*
  - Hubs não armazenam quadros → Colisões são possíveis
    - *CSMA/CD deve ser usado*
  - Quadro de tamanho mínimo é transmitido mais rápido
    - *64 bytes podem ser transmitidos 100 vezes mais rápidos que no Fast Ethernet*
      - *Nesse caso, tamanho máximo da rede deveria ser de 25 m para garantir detecção de colisão!*

**Como aumentar a distância máxima da rede para que ela não fique limitada aos 25m?**

# Gigabit Ethernet com Par Trançado: Modo *Half-duplex*

- Soluções para aumento da distância:
  - Extensão de portadora
    - Hardware usa enchimento (após o CRC) para estender o quadro até 512 bytes
      - Quais as vantagens e as desvantagens?

# Gigabit Ethernet com Par Trançado: Modo *Half-duplex*

- Soluções para aumento da distância:
  - Extensão de portadora
    - Hardware usa enchimento (após o CRC) para estender o quadro até 512 bytes
      - Quais as vantagens e as desvantagens?
      - **Vantagem:** software não precisa ser mudado
      - **Desvantagem:** menor eficiência da rede

# Gigabit Ethernet com Par Trançado: Modo *Half-duplex*

- Soluções para aumento da distância:
  - Envio de quadro em rajadas
    - Primeiro quadro enviado normalmente
      - Com extensão, se necessário...
    - Demais quadros são enviados em rajada até atingir 512 Bytes
      - Sem nenhuma extensão
      - Símbolos são usados nos intervalos entre quadros para não deixar outra estação obter o meio
  - **Vantagem:** mais eficiente que a extensão de portadora

# Gigabit Ethernet com Par Trançado: Modo *Full-duplex*

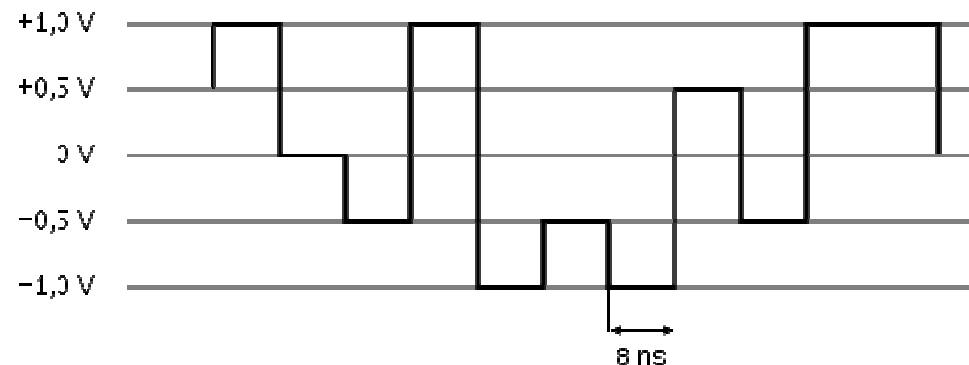
- Usado entre **comutador central** e estação
  - Transmissor não precisa detectar o canal
    - Não há com quem colidir (*CSMA/CD não é utilizado*)
  - Comutador pode receber quadros de mais de uma estação
    - Comutadores possuem memória em todas as portas
  - Comprimento do cabo é função da intensidade do sinal
    - Não mais pelo tempo de ida e volta de um sinal de ruído
  - Comutadores podem se misturar
    - Autonegociação de taxas: 10, 100 ou 1000 Mb/s

# Gigabit Ethernet com Par Trançado

- 1000Base-CX
  - STP (*Shielded Twisted Pair*)
    - 2 pares de no máximo 25 m
  - Codificação 8B/10B

# Gigabit Ethernet com Par Trançado

- 1000Base-T
  - UTP cat 5 → 4 pares em modo *full-duplex*
    - Codificação 5-PAM (*Pulse Amplitude Modulation*)
      - 4 níveis para dados e 1 para controle e enquadramento



- Envio de 2 bits/símbolo em paralelo em cada um dos pares
- Taxa de 125 MSímbolos/s
  - $125 \text{ MSímbolos/s} \times 2 \text{ bits/símbolo} \times 4 \text{ pares} = 1 \text{ Gb/s}$



# Gigabit Ethernet com Fibra Óptica

- Funciona nos modos *half-duplex* e *full-duplex*
- Pode usar controle de fluxo quando no modo *full-duplex*

# Gigabit Ethernet com Fibra Óptica

- 1000Base-SX: Lambdas entre 770 e 860 nm
  - Fibra multimodo
    - Tamanho máximo do segmento de 550 m
  - Codificação 8B/10B
- 1000Base-LX: Lambdas entre 1.270 e 1.355 nm
  - Fibra monomodo
    - Tamanho máximo do segmento de 5000 m
  - Fibra multimodo
    - Tamanho máximo do segmento de 550 m
  - Codificação 8B/10B

# Controle de Fluxo no Gigabit Ethernet

- Taxa de transmissão é elevada
  - Atraso de 1 ms na recepção dos dados...
    - Leva a acúmulo de 1953 quadros em buffer
- Comunicação entre máquinas Gigabit e Fast Ethernet
  - Leva a estouros frequentes de buffer

**Logo, padrão define controle de fluxo**

# Controle de Fluxo no Gigabit Ethernet

- Realizado a partir da transmissão de um quadro de controle especial entre receptor e transmissor
  - Quadro informa o transmissor que o receptor precisa fazer uma pausa
    - Por período predeterminado que pode ser de até 33,6 ms no Gigabit Ethernet

# 10-Gigabit Ethernet (10 Gb/s)

- IEEE 802.3ae (2002)
  - Usa fibra óptica como meio
  - Mantêm o formato e os tamanhos mínimo e máximo do quadro
  - Funciona no modo *full-duplex*
  
- IEEE 802.3an (2006)
  - Usa par trançado como meio

# Virtualização do Enlace

# Virtualização do Enlace

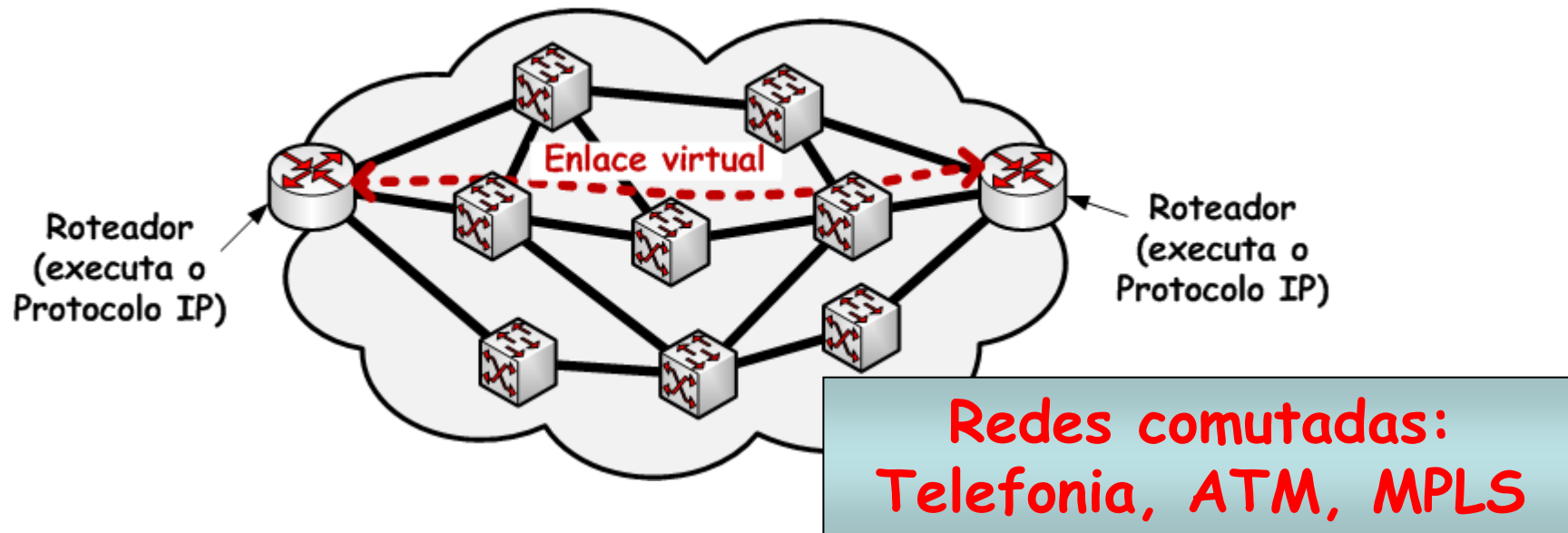
- Definição do enlace
  - Canal que provê comunicação eficiente e confiável de unidades de informação entre dois nós adjacentes

Entretanto...

- Protocolo PPP liga dois nós conectados através de uma rede de telefonia
  - **Rede de telefonia tem seus próprios comutadores, enlaces e pilhas de protocolos!**

# Virtualização do Enlace

- Do ponto de vista da camada de rede da Internet...
  - A rede de telefonia representa um único enlace
    - Enlace é todo "canal" que conecta dois nós da Internet
  - Nós intermediários comutam pacotes ao invés de roteá-los





# Encaminhamento X Roteamento

- Roteamento
  - Decisão de qual caminho seguir
- Encaminhamento
  - Busca do caminho depois da decisão tomada

# Encaminhamento X Roteamento

- Algoritmo de roteamento
  - Decide em qual enlace de saída um pacote deve ser transmitido
  - Constrói a tabela de roteamento
    - Contém o mapeamento entre os endereços de rede e estações e as portas de saída do roteador
- Algoritmo de encaminhamento
  - Faz a busca de qual porta de saída está associada a um endereço

# Encaminhamento X Roteamento

- Comutadores
  - Mais rápidos
  - Menos custosos
  - Não usam endereçamento hierárquico
- Roteadores
  - Mais lentos
  - Mais custosos
  - Usam endereçamento hierárquico

# ATM

*(Asynchronous Transfer Mode)*

# ATM

- Padrão de alta velocidade
  - Proposto nos anos 90
  - 155 Mb/s a 622 Mb/s e taxas superiores
  - Arquitetura da RDSI-FL (Rede de Serviços Integrados - Faixa Larga)

# ATM

- Objetivo
  - Transporte fim-a-fim integrado para voz, vídeo e dados
    - Atender os requisitos de sincronismo e QoS para voz e vídeo
      - Ao contrário do modelo de melhor esforço da Internet
    - "Próxima geração" da telefonia
      - Raízes técnicas no mundo da telefonia
- Características principais
  - Comutação de células usando circuitos virtuais
    - Pacotes de comprimento fixo

# Circuitos Virtuais

- Emular uma rede de comutação de circuitos
  - Caminho da origem ao destino “se comporta” como um circuito telefônico
    - Em termos de desempenho
    - Em ações da rede ao longo do caminho

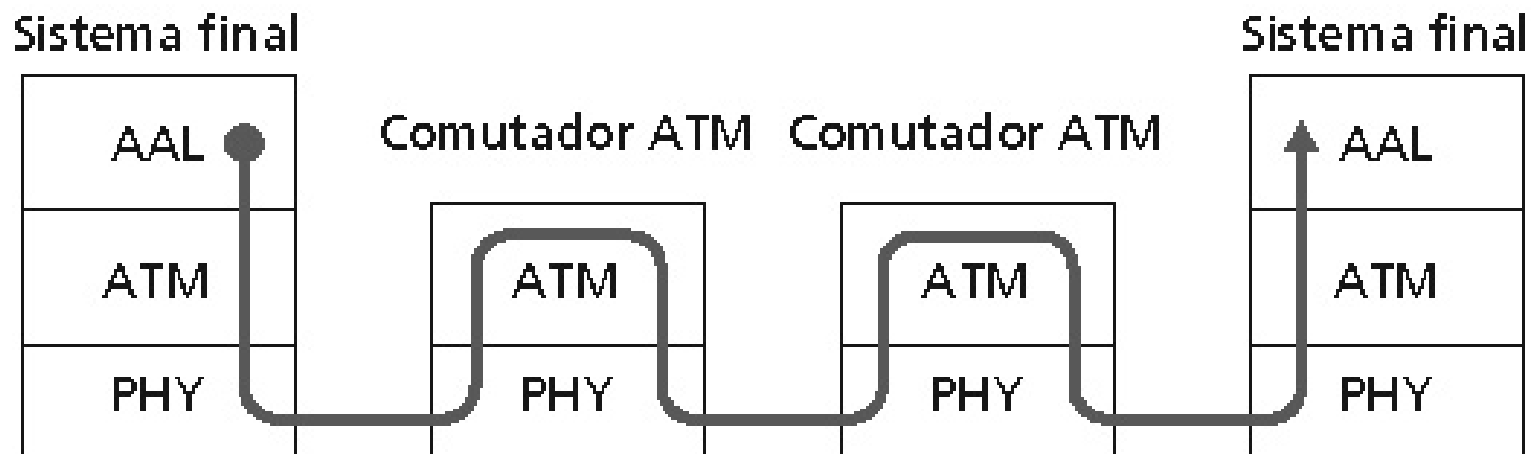
# Circuitos Virtuais

- Funcionamento
  - Estabelecimento de uma **chamada** antes do envio dos dados
  - Cada pacote carrega a identificação do circuito virtual
    - Ao invés de endereços de origem e destino
  - Cada roteador no caminho origem-destino mantém **estado** para cada conexão que o atravessa
    - Cada conexão está associada a um CV
  - Recursos de enlace, roteador (banda, *buffers*) podem ser **alocados** ao circuito virtual



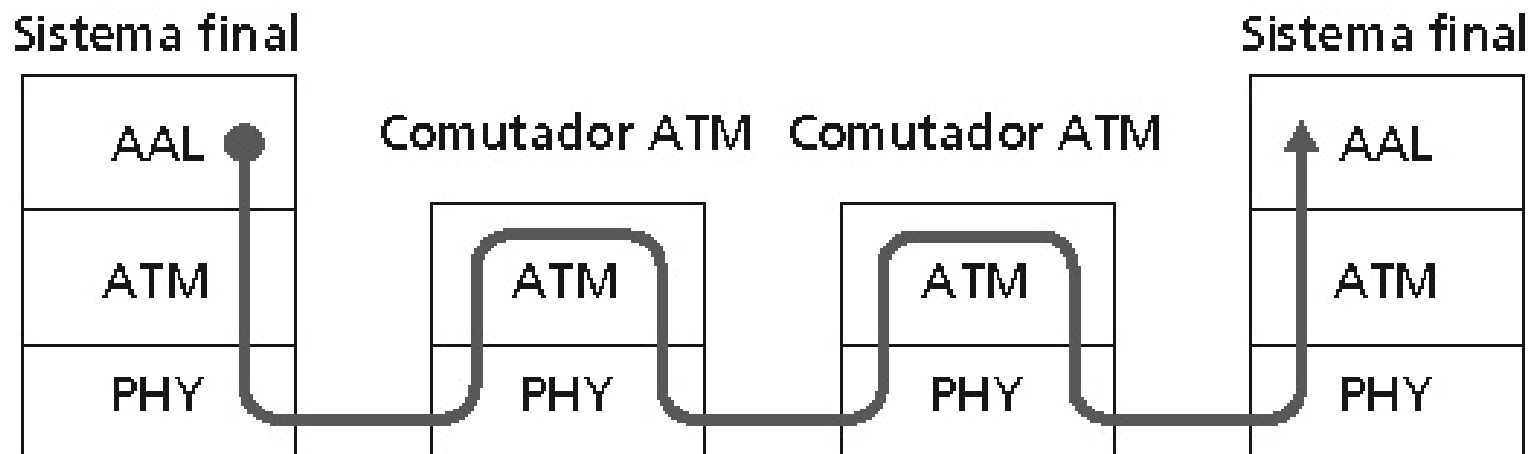
# Arquitetura ATM

- Camada de adaptação (AAL)
  - Apenas nas bordas de uma rede ATM
  - Segmentação e remontagem dos dados
  - Analogia com a camada de transporte



# Arquitetura ATM

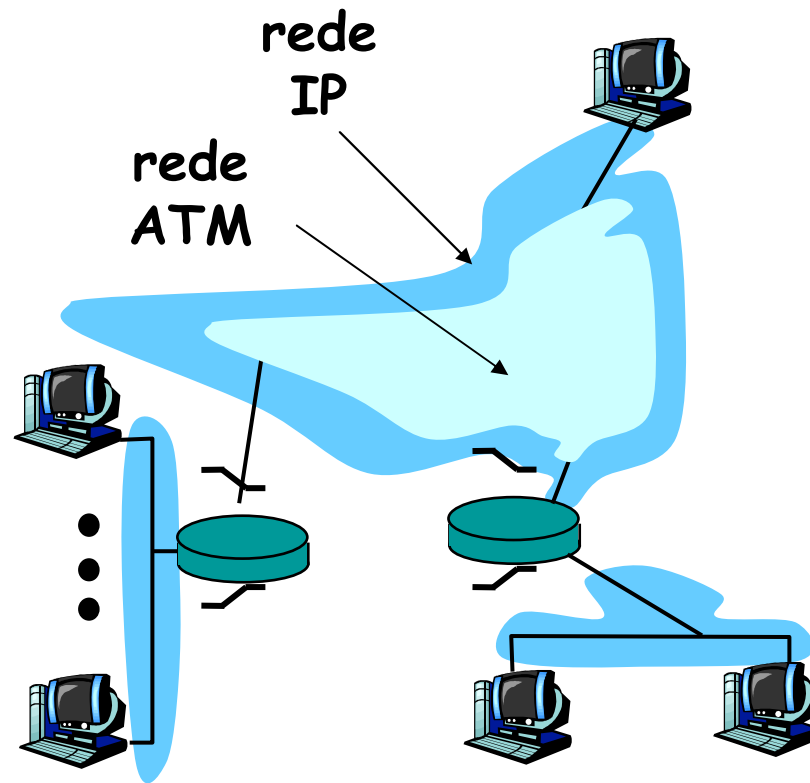
- Camada ATM
  - Comutação de células e roteamento
  - Analogia com a camada de rede
- Camada física (PHY)



# ATM: Rede ou Enlace?

- Conceitualmente
  - Transporte fim-a-fim
    - Entre estações
  - ATM é uma tecnologia de rede
- Na realidade
  - Usada para conectar roteadores de um *backbone* IP
  - "IP sobre ATM"
    - ATM como uma camada de enlace comutada, conectando roteadores IP

# ATM: Rede ou Enlace?



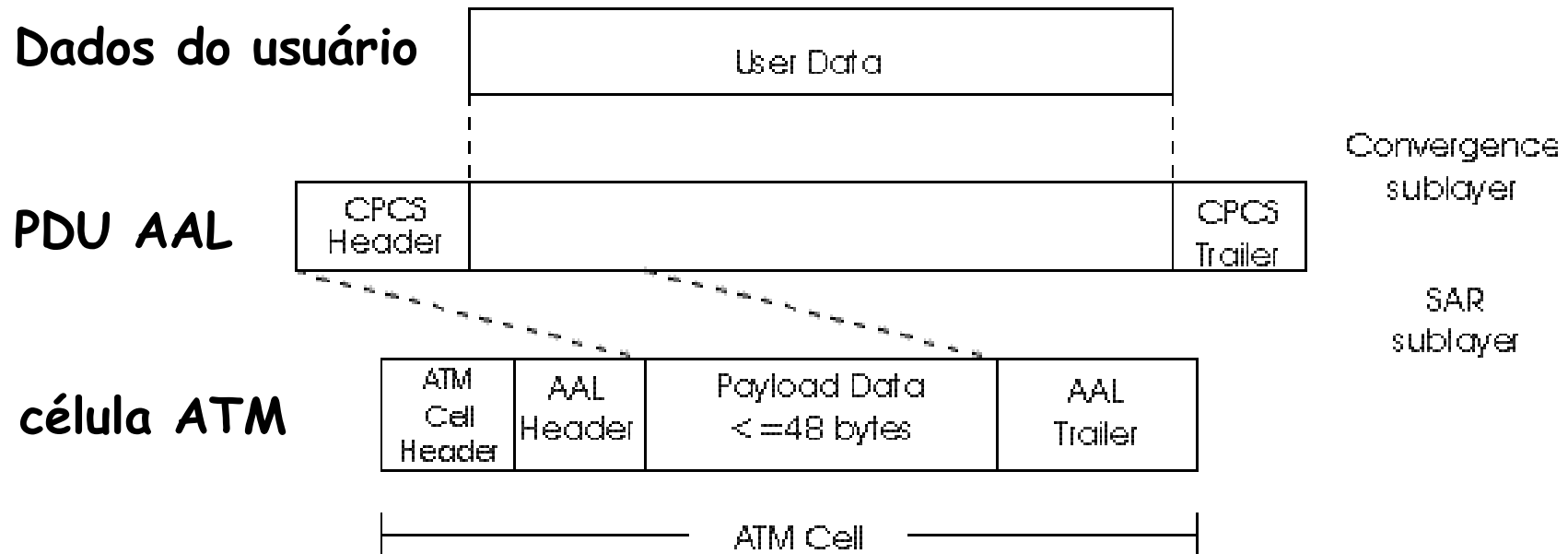
# Camada de Adaptação ATM

- *AAL (ATM Adaptation Layer)*
  - É responsável por "adaptar" as camadas superiores (IP ou aplicações nativas ATM) à camada ATM abaixo
- **AAL está presente apenas nos sistemas finais**
  - Não nos comutadores ATM
- Segmento AAL (campos de cabeçalho/cauda, dados) são fragmentados em múltiplas células ATM
  - Analogia
    - **Segmento TCP em muitos pacotes IP**

# Camada de Adaptação ATM

- Diferentes versões de camadas AAL, dependendo da classe de serviço ATM:
  - AAL1
    - Para serviços CBR (*Constant Bit Rate*)
      - Ex.: emulação de circuitos
  - AAL2
    - Para serviços VBR (*Variable Bit Rate*)
      - Ex.: vídeo MPEG
  - AAL5
    - Para dados
      - Ex.: datagramas IP

# Camada de Adaptação ATM



# Camada ATM

- Transporta células através da rede ATM
  - Análoga à camada de rede IP
  - Porém, com **serviços muito diferentes** aos da camada IP
    - *CBR (Constant Bit Rate)*
      - Tráfego com taxa constante
    - *VBR (Variable Bit Rate)*
      - Tráfego em rajadas com garantia de banda
    - *ABR (Available Bit Rate)*
      - Tráfego em rajadas sem garantia de banda
    - *UBR (Unspecified Bit Rate)*
      - Tráfego que não tem requisitos de tempo, perdas e banda



# Camada ATM

Arquitetura de Rede	Modelo de serviço	Garantias ?				Informa s/ congestion.?
		Banda	Perdas	Ordem	Tempo	
Internet	melhor esforço	nenhuma	não	não	não	não (inferido via perdas)
ATM	CBR	taxa constante	sim	sim	sim	sem congestion.
ATM	VBR	taxa garantida	sim	sim	sim	sem congestion.
ATM	ABR	mínima garantida	não	sim	não	sim
ATM	UBR	nenhuma	não	sim	não	não

# Camada ATM: Circuitos Virtuais

- Emular uma rede de comutação de circuitos utilizando comutação de pacotes
  - Caminho da origem ao destino "se comporta" como um circuito telefônico
    - Em termos de desempenho
    - Em ações da rede ao longo do caminho

# Camada ATM: Circuitos Virtuais

- Funcionamento
  - Estabelece chamada antes do envio dos dados
    - Orientado a conexão
  - Cada célula possui identificação do circuito virtual (CV)
    - Ao invés de endereços de origem e destino
  - Cada roteador no caminho origem-destino mantém estado por conexão que o atravessa
    - Cada conexão está associada a um CV
  - Recursos de enlace e roteador (banda, buffers) podem ser alocados ao CV

# Camada ATM: Circuitos Virtuais

- Um CV consiste de:
  - Caminho da origem para o destino
  - Números (identificadores) de CV
    - Um número para cada enlace ao longo do caminho
  - Entradas nas tabelas de encaminhamento dos roteadores ao longo do caminho
- Pacotes de um dado CV carregam o número desse CV
  - Número do CV deve ser trocado a cada enlace
  - Novo número do CV vem da tabela de encaminhamento

# Circuitos Virtuais: Encaminhamento

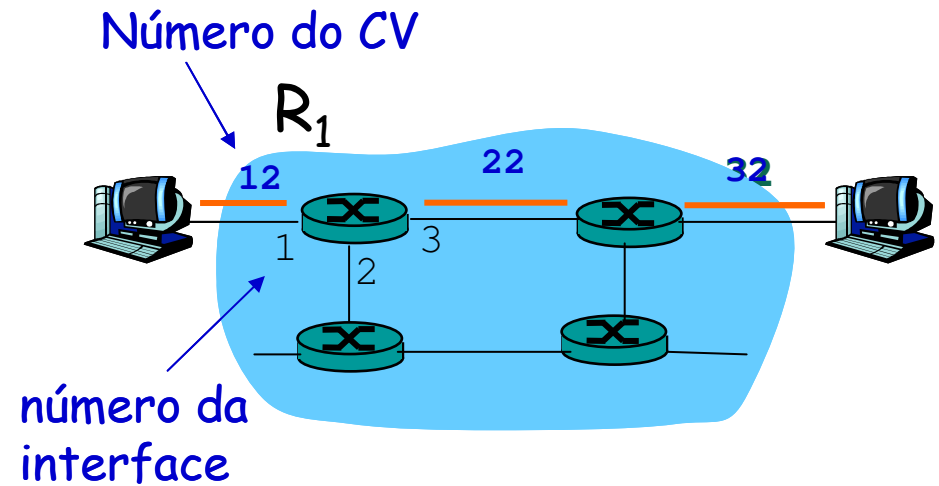
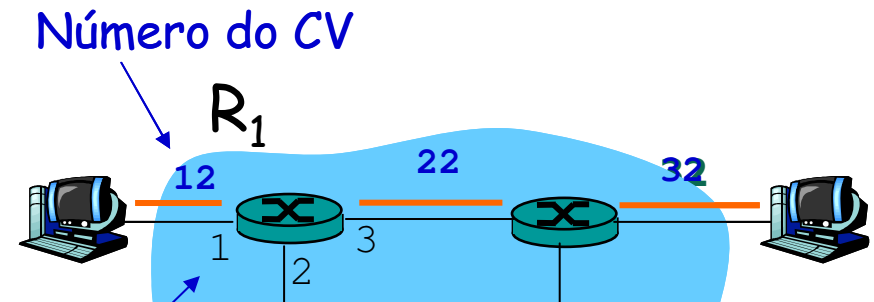


Tabela de encaminhamento  
no roteador  $R_1$

Interf. de entrada	#CV de entrada	Interf. de saída	#CV de saída
1	12	3	22
2	63	1	18
3	7	2	17
1	97	3	87
...	...	...	...

# Circuitos Virtuais: Encaminhamento



Roteadores mantêm informação sobre o estado da conexão!

Tab...  
no roteador R<sub>1</sub>

Interf. de entrada	#CV de entrada	Interf. de saída	#CV de saída
1	12	3	22
2	63	1	18
3	7	2	17
1	97	3	87
...	...	...	...

# Camada ATM: Circuitos Virtuais

- CVs Permanentes (PVCs)
  - Conexões de longa duração
  - Típico
    - Rota "permanente" entre roteadores IP
- CVs Comutados (SVCs)
  - Estabelecimento dinâmico a cada chamada

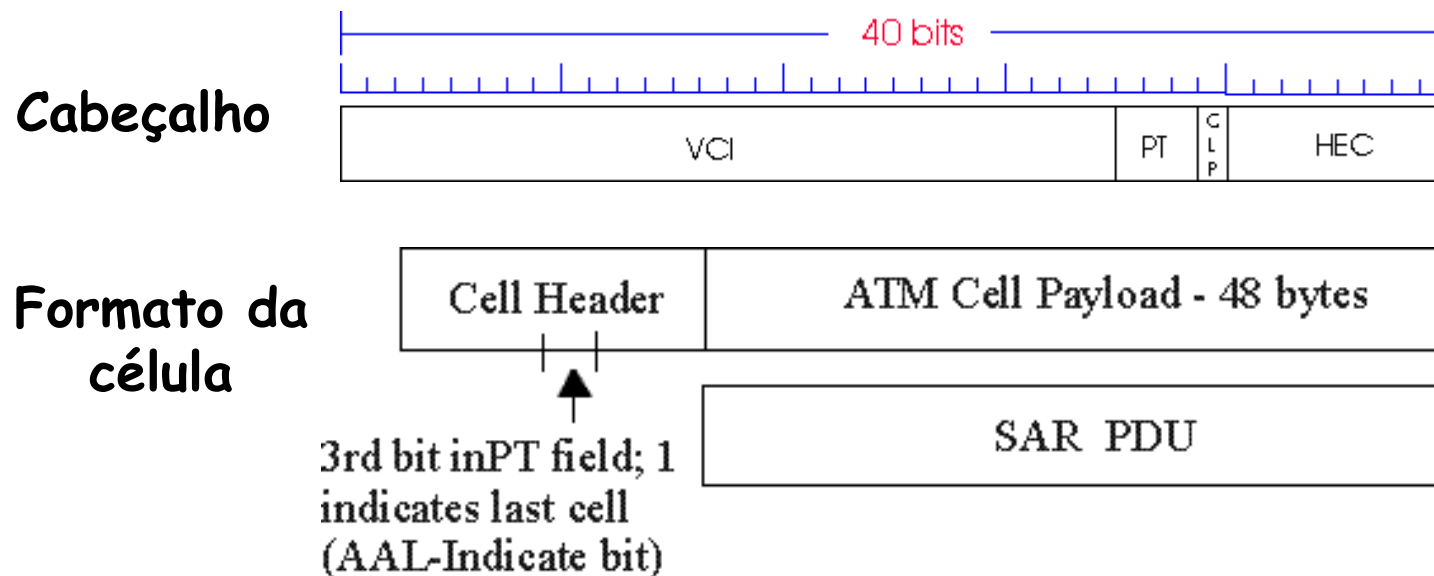
# Camada ATM: Circuitos Virtuais

- Vantagens da abordagem de CVs do ATM
  - Garantia de desempenho de QoS para a conexão é mapeada no CV
    - *Largura de banda, atraso, jitter*
- Desvantagens da abordagem de CVs do ATM
  - Suporte ineficiente ao tráfego de datagramas
  - Um PVC para cada par origem/destino não é escalável
    - *São necessárias  $N^2$  conexões*
  - SVCs introduzem atraso de estabelecimento de conexão
    - *Sobrecarga de processamento para conexões curtas*



# Camada ATM: Célula

- Cabeçalho da célula ATM de 5 bytes
- Carga útil (*payload*) de 48 bytes
- Por que esses tamanhos são usados?
  - Pequena carga → Tempo curto para criação de célula para voz digitalizada



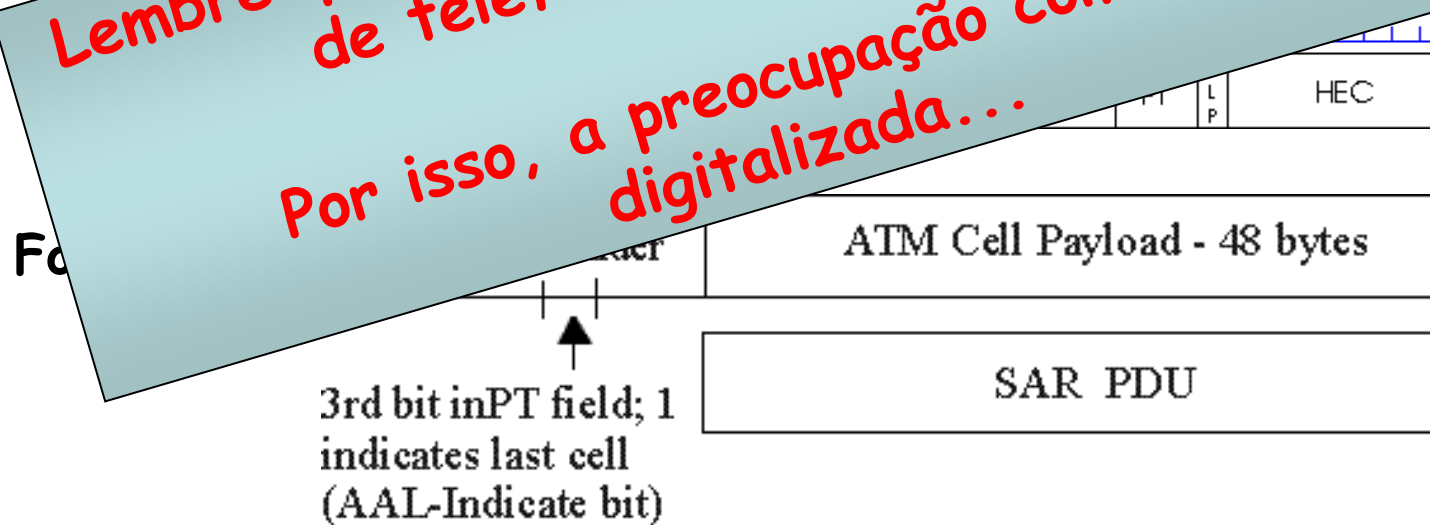
# Camada ATM: Célula

- Cabeçalho da célula ATM de 5 bytes
- Carga útil (*payload*) de 48 bytes

- Por que esses tamanhos são usados?

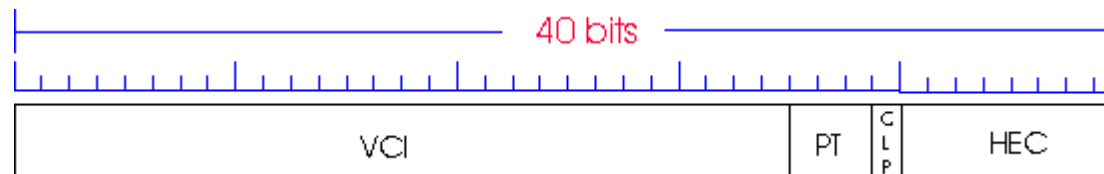
- Pequena carga → Tempo de transmissão para voz digitalizada

**Lembre que o ATM foi criado como uma rede de telefonia de nova geração!**  
**Por isso, a preocupação com a voz digitalizada...**



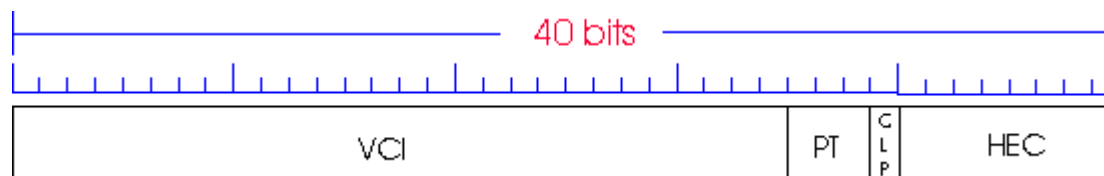
# Cabeçalho da Célula ATM

- VCI
  - ID do circuito virtual
    - Mudará a cada enlace através da rede
- PT
  - Tipo da carga
    - Ex. célula de dados



# Cabeçalho da Célula ATM

- CLP
  - Bit de prioridade de perda de célula (*Cell Loss Priority*)
    - CLP = 1 indica célula de baixa prioridade, pode ser descartada em caso de congestionamento
- HEC (*Header Error Checksum*)
  - Verificação de redundância cíclica



# Camada Física ATM

- Dividida em duas subcamadas
  - Subcamada de Convergência de Transmissão (TCS - *Transmission Convergence Sublayer*)
    - Adapta a camada superior, ATM, à subcamada PMD abaixo
  - Subcamada Dependente do Meio Físico (PMD - *Physical Medium Dependent*)
    - Depende do meio físico que está sendo utilizado

# Camada Física ATM

- Subcamada de Convergência de Transmissão (TCS) é responsável por:
  - Geração do *checksum* do cabeçalho
    - CRC de 8 bits
  - Delimitação da Célula
  - Na subcamada PMD "não estruturada", células ociosas são enviadas quando não há células de dados para transmitir
    - Manutenção do sincronismo

# Camada Física ATM

- Subcamada Dependente do Meio Físico (PMD)
- SONET/SDH
  - Estrutura de quadro de transmissão (como um container transportando bits)
    - Sincronização de bits
    - Particionamento da largura de banda (TDM)
    - Diversas velocidades
      - OC3/STM-1 → 155,52 Mb/s
      - OC12/STM-4 → 622,08 Mb/s
      - OC48/STM-16 → 2,45 Gb/s
      - OC192/STM-64 → 9,6 Gb/s

# Camada Física ATM

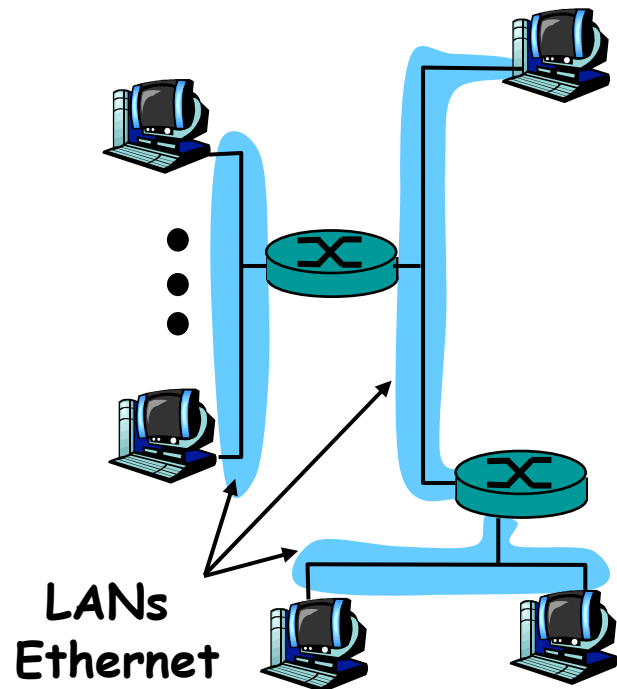
- T1/T3
  - Estrutura de quadro de transmissão
  - Antiga hierarquia de telefonia usada nos EUA
    - 1,5 Mb/s e 45 Mb/s
- E1/E3
  - Estrutura de quadro de transmissão
  - Antiga hierarquia de telefonia usada no Brasil
    - 2 Mb/s e 34 Mb/s
- Não estruturada
  - Apenas células: ocupadas/ociosas



# IP-Sobre-ATM

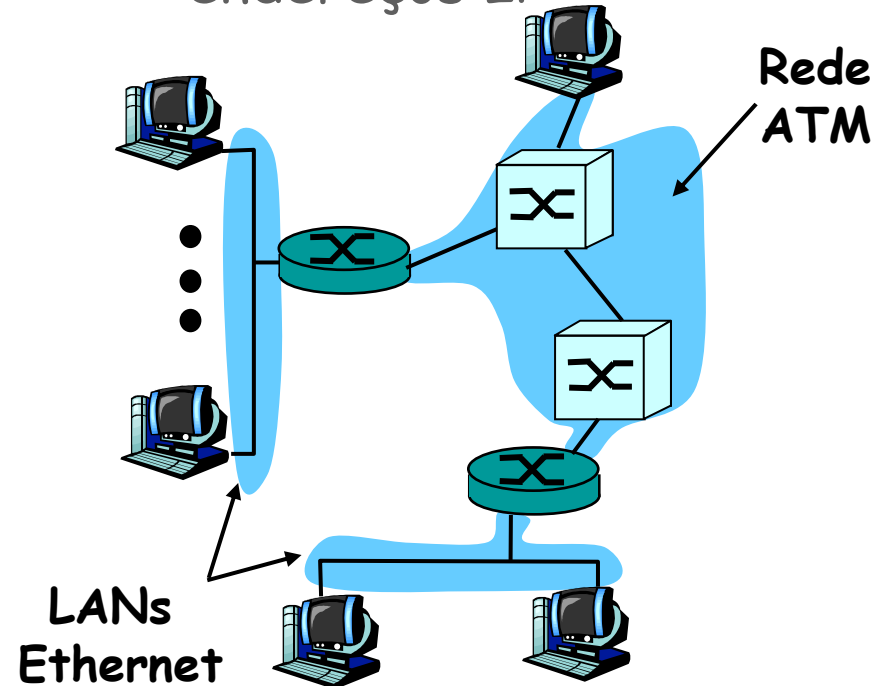
- **Apenas IP**

- 3 "redes" (ex, segmentos de LAN)
- endereços MAC (802.3) e IP

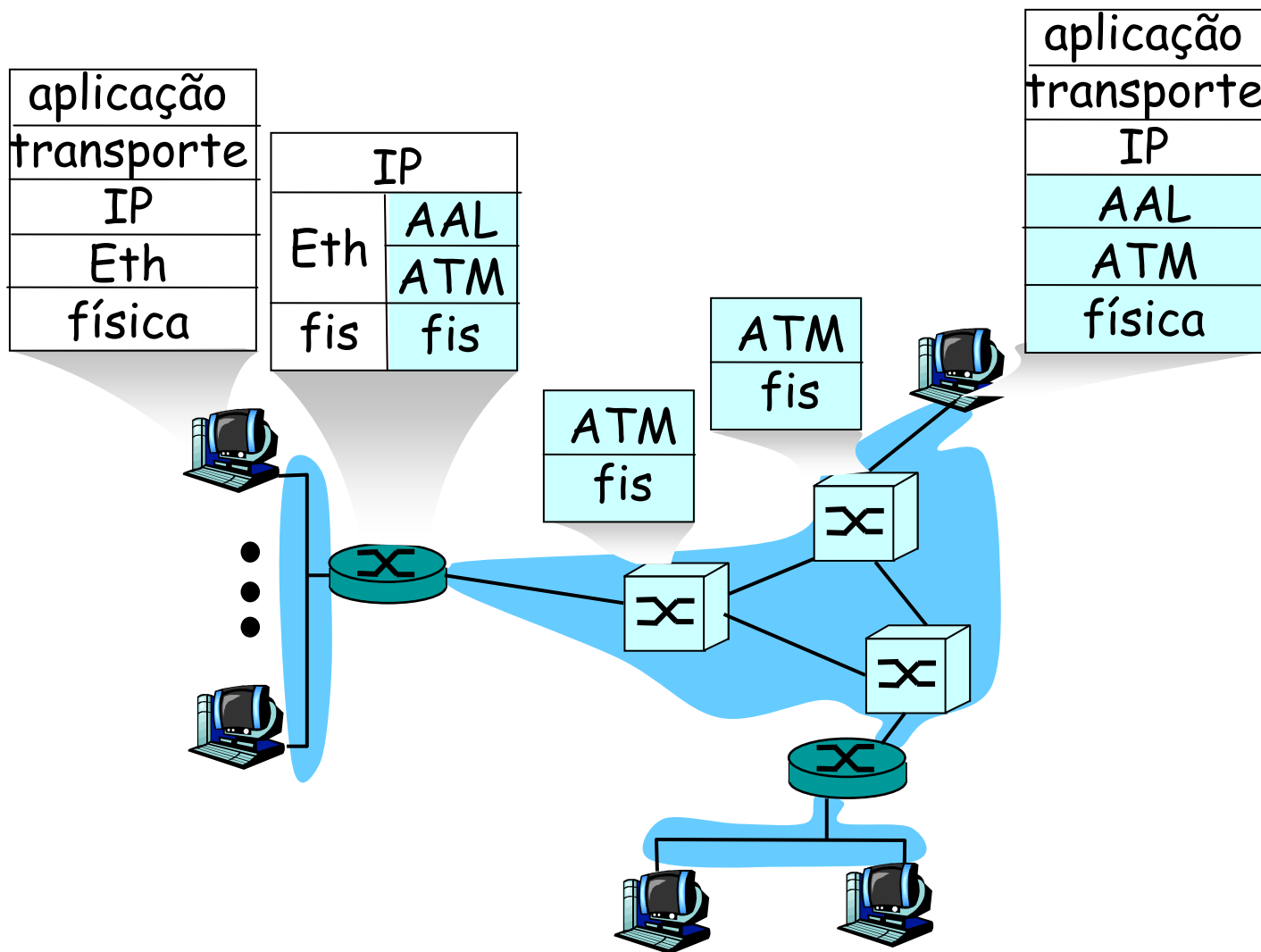


- **IP sobre ATM**

- Substitui uma "rede" (ex., segmento LAN) por uma rede ATM
- Endereços ATM e endereços IP



# IP-Sobre-ATM



# Datagrama em uma Rede IP-Sobre-ATM

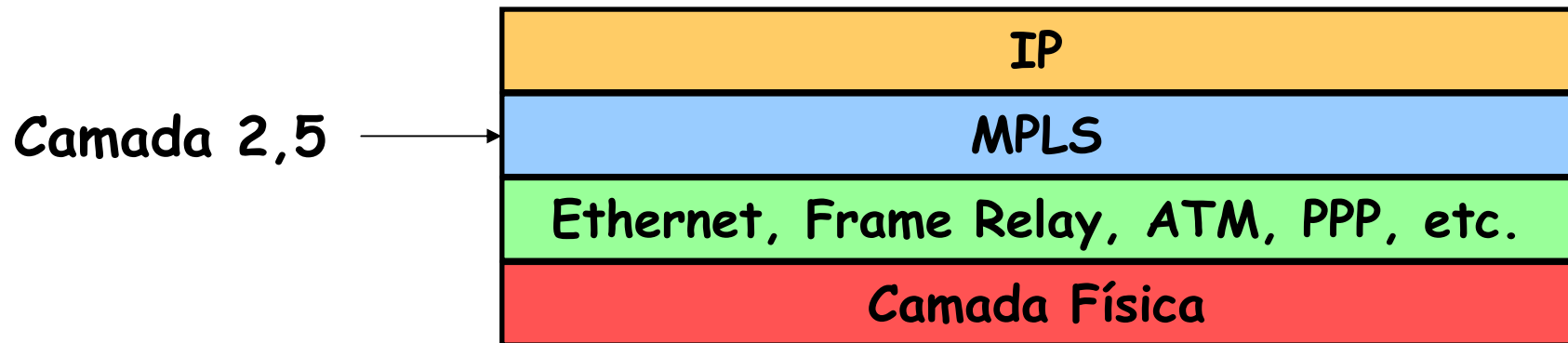
- **Na estação de origem**
  - Camada IP faz o mapeamento entre endereços destino IP e ATM (usando ARP)
  - Passa o datagrama para a AAL5
  - A AAL5 encapsula os dados, segmenta em células e passa para a camada ATM
- **Rede ATM**
  - Encaminha a célula através do CV até o destino
- **Na estação de destino**
  - A AAL5 junta as células para montar o datagrama original
  - Se o CRC estiver OK → datagrama é passado para o IP

# MPLS

*(MultiProtocol Label Switching)*

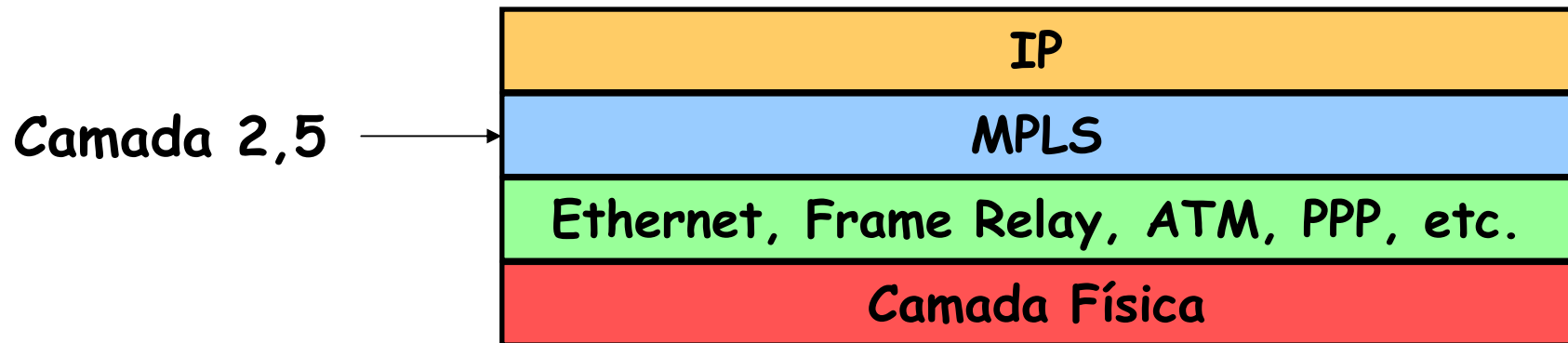
# MPLS

- Comutação por rótulos
- Construção de circuitos virtuais
- Diminuir o custo computacional do roteamento



# MPLS

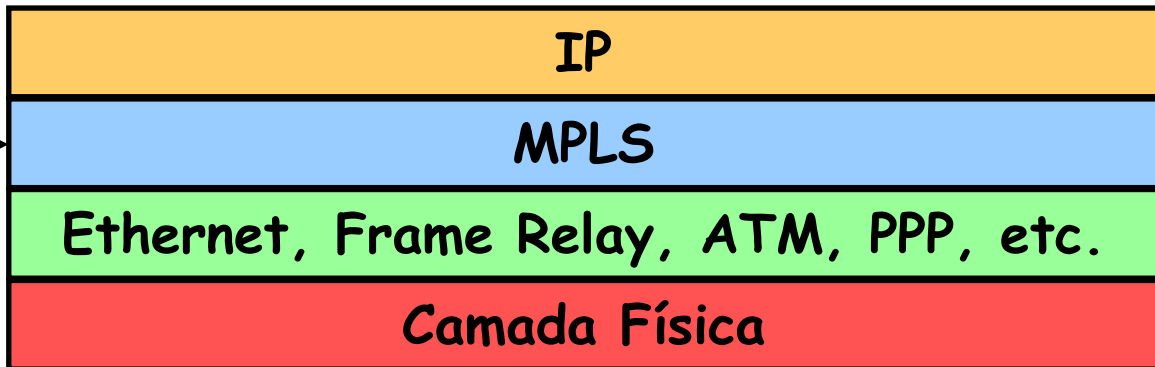
- Garante encaminhamento rápido dos pacotes e QoS
  - Indexação rápida em uma tabela de comutação
  - Circuitos virtuais possibilitam a reserva de recursos
- Evita a análise do cabeçalho IP
  - Muita informação para escolher o próximo salto



# MPLS

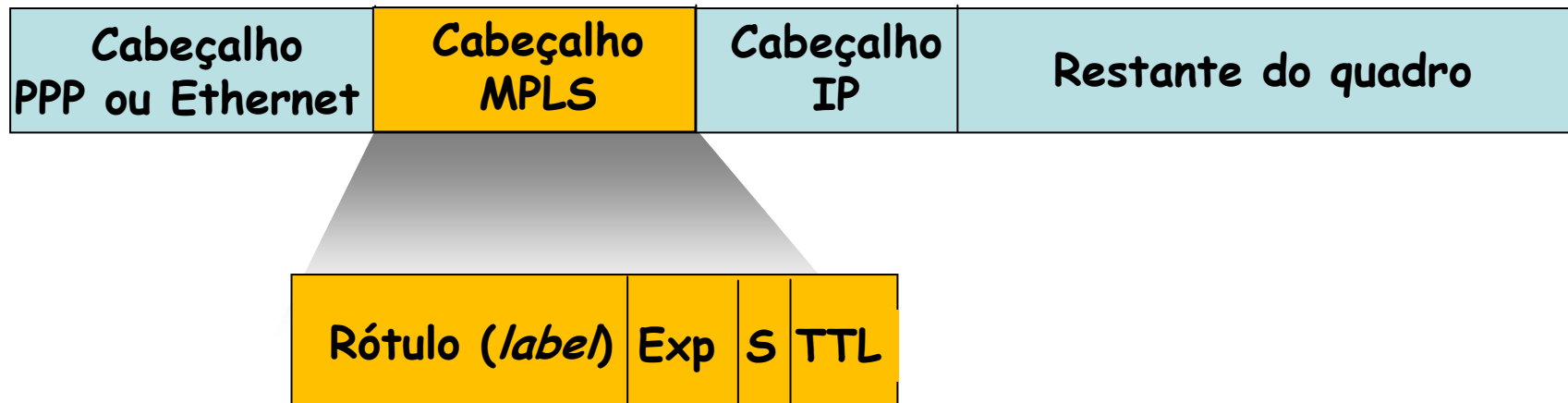
- Garante encaminhamento rápido
  - Indexação rápida em tabelas
  - Circuitos estabelecidos antes de recursos
- **Note que o MPLS opera sobre o próprio ATM, o que elimina a dependência de outras tecnologias de redes**
- Encaminhamento baseado em rótulos IP
- Informação para escolher o próximo salto

Camada 2,5



# MPLS

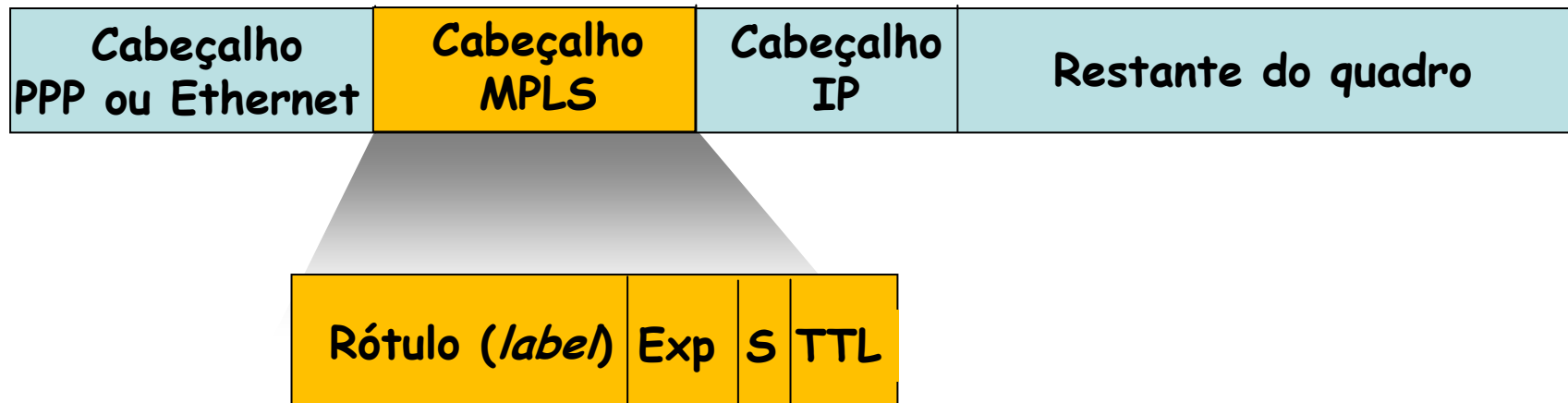
- Comutação de rótulos
- Objetivo inicial
  - Acelerar o encaminhamento IP
    - **Uso de rótulo de comprimento fixo ao invés de endereço IP**





# MPLS

- Ideias similares às da abordagem de circuitos virtuais
  - Mas os datagramas ainda mantêm o endereço IP
- Usado para fazer **engenharia de tráfego**



# Roteador com Suporte ao MPLS

- Chamado de Roteador de comutação de rótulos
  - LSR (*Label-Switched Router*)
- Encaminha os pacotes para a interface de saída baseada apenas no valor do rótulo
  - Não verifica o endereço IP de destino
    - Também não faz busca por prefixo mais longo
- A tabela de encaminhamento do MPLS é distinta da tabela de encaminhamento do IP

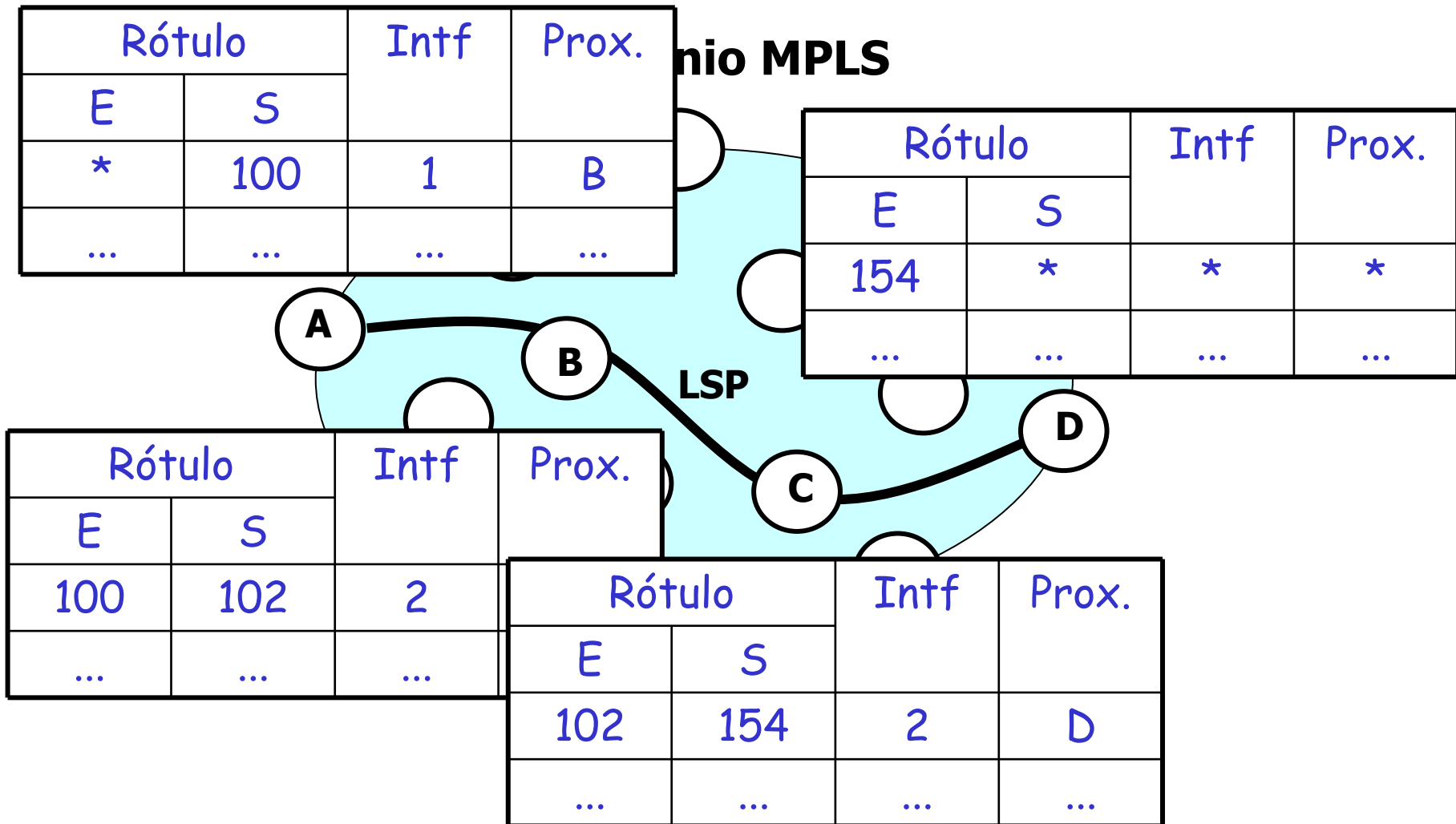
# Roteador com Suporte ao MPLS

- Interage com a rede MPLS
  - Associa endereço IP de destino com rótulos MPLS
- Executa protocolo de sinalização para criar caminhos
  - Chamadas de LSPs (*Label-Switched Paths*)
  - Sinalização usando o RSVP-TE
    - Permite engenharia de tráfego
    - Possível repasse através de caminhos que o IP sozinho não permitiria
      - Ex.: roteamento específico da origem
- Deve coexistir com roteadores apenas IP

# Domínio MPLS

- Roteador comutado por rótulo - LSRs
  - Encaminhamento de acordo com o rótulo e interface
  - Rótulo trocado a cada salto
  - Mapeamento constante
- Caminho dos pacotes - LSPs
- Pacotes com mesmo rótulo pertencem a mesma classe de encaminhamento (FEC)

# Encaminhamento no MPLS



# Pontes

# Pontes

- Usadas para interconectar múltiplas redes Ethernet
  - Múltiplas redes físicas são conectadas em uma única rede lógica
    - Comutador é um nome mais moderno para ponte
- Qual o interesse em usar múltiplas redes Ethernet?
  - Podem isolar as redes fisicamente em múltiplos domínios paralelos
  - Podem ser mais econômicas caso as redes estejam isoladas geograficamente
    - Interconexão não é feita com um comutador central

# Criação de Pontes Transparentes

- Redes interconectadas por pontes devem funcionar de forma transparente
  - Algoritmo de aprendizado reverso
    - Evita que o tráfego seja enviado para onde não é necessário
  - Algoritmo de árvore de espalhamento (*spanning tree*)
    - Evita que haja laços (*loops*) de encaminhamento entre comutadores

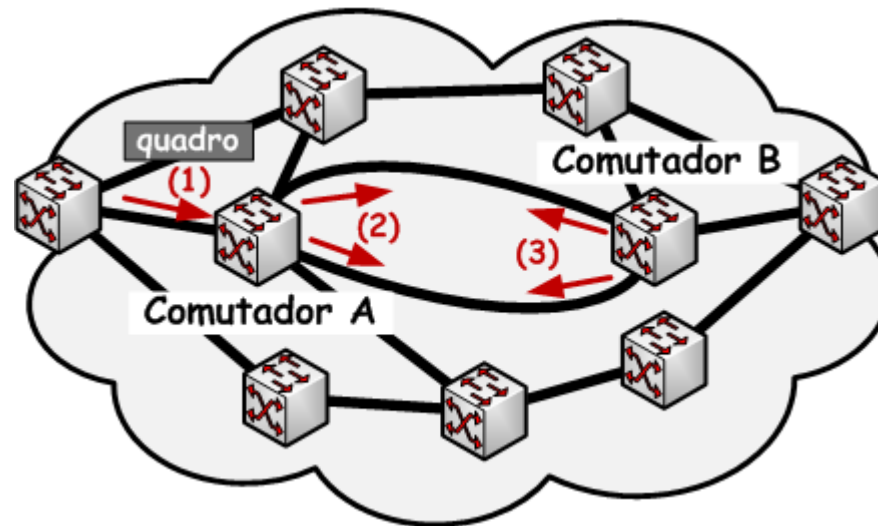


# Algoritmo de Aprendizado Reverso

- Todas as estações conectadas a uma mesma porta...
  - Pertencem ao mesmo domínio de colisão
- Pontes funcionam em modo promíscuo
  - Examinam quadros enviados em qualquer rede conectada
  - Caso o destino não pertença à rede de origem
    - Quadro é encaminhado usando a tabela de comutação
      - Origem desconhecida → Aprende a porta que a conecta
      - Destino desconhecido → Aprende por inundação

# Algoritmo de Árvore de Espalhamento

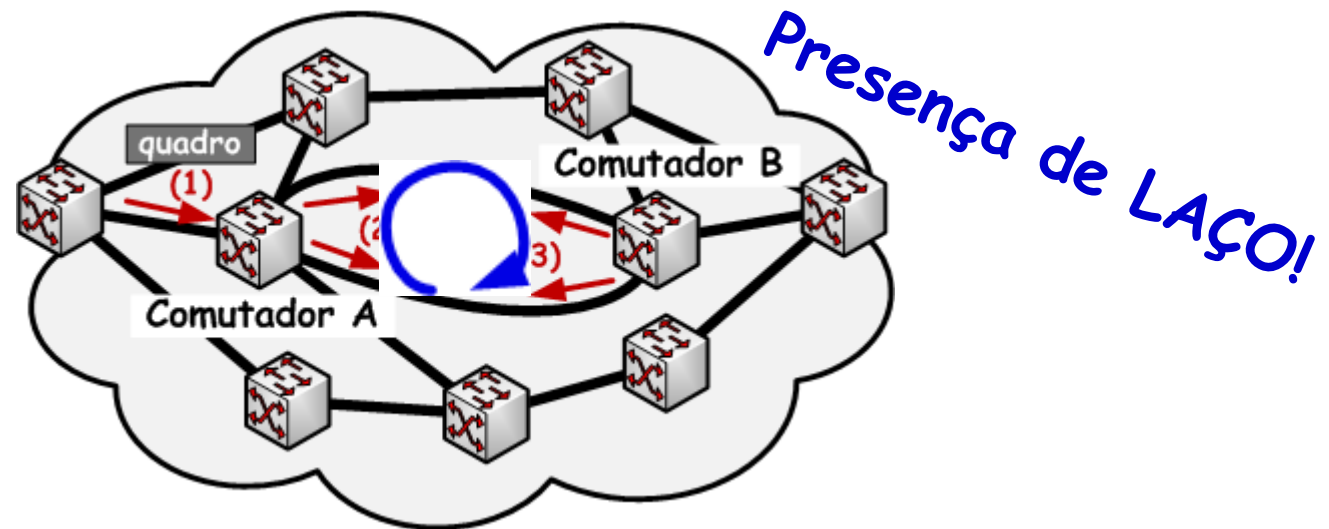
- Evita que enlaces redundantes gerem laços



**O Comutador A não sabe que a Comutador B está inundando a rede com quadros que foram encaminhados por ele próprio anteriormente. Esses quadros chegaram ao Comutador por outros caminhos da rede!**

# Algoritmo de Árvore de Espalhamento

- Evita que enlaces redundantes gerem laços

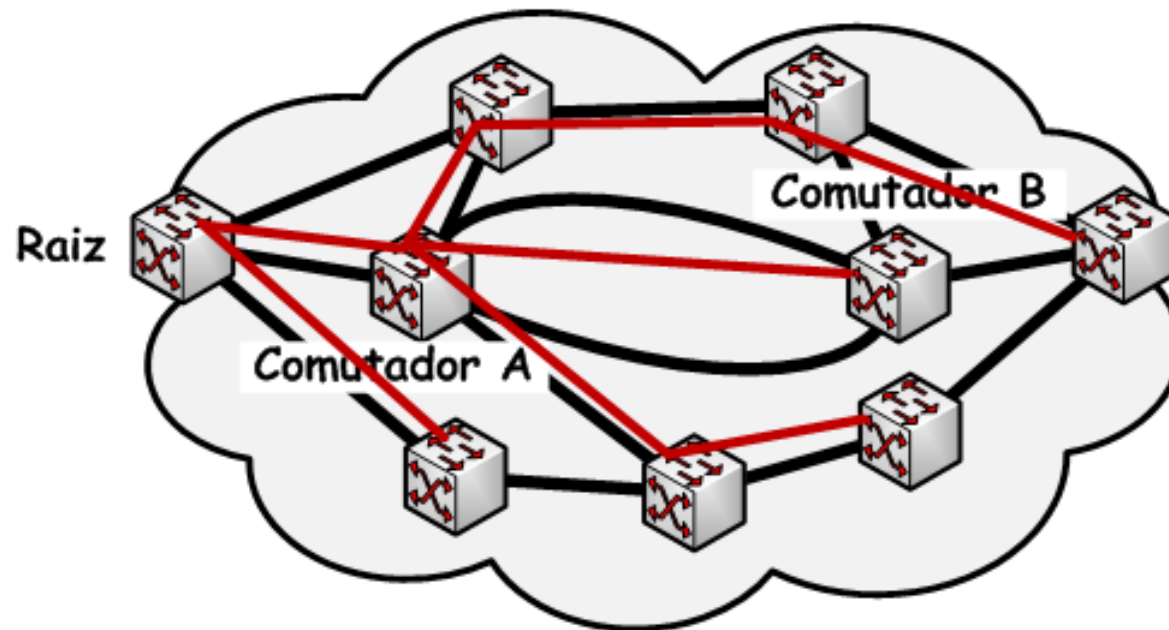


**O Comutador A não sabe que o Comutador B está inundando a rede com quadros que foram encaminhados por ele próprio anteriormente. Esses quadros chegaram ao Comutador por outros caminhos da rede!**

# Algoritmo de Árvore de Espalhamento

- Sobreposição topologia real com árvore de espalhamento
  - Evita assim as redundâncias
    - Primeiro há a eleição de um nó raiz
      - Nó com menor identificador, por exemplo
    - Em seguida, uma árvore de caminhos mais curtos é construída a partir do nó raiz
      - Informações são difundidas entre os comutadores

# Algoritmo de Árvore de Espalhamento

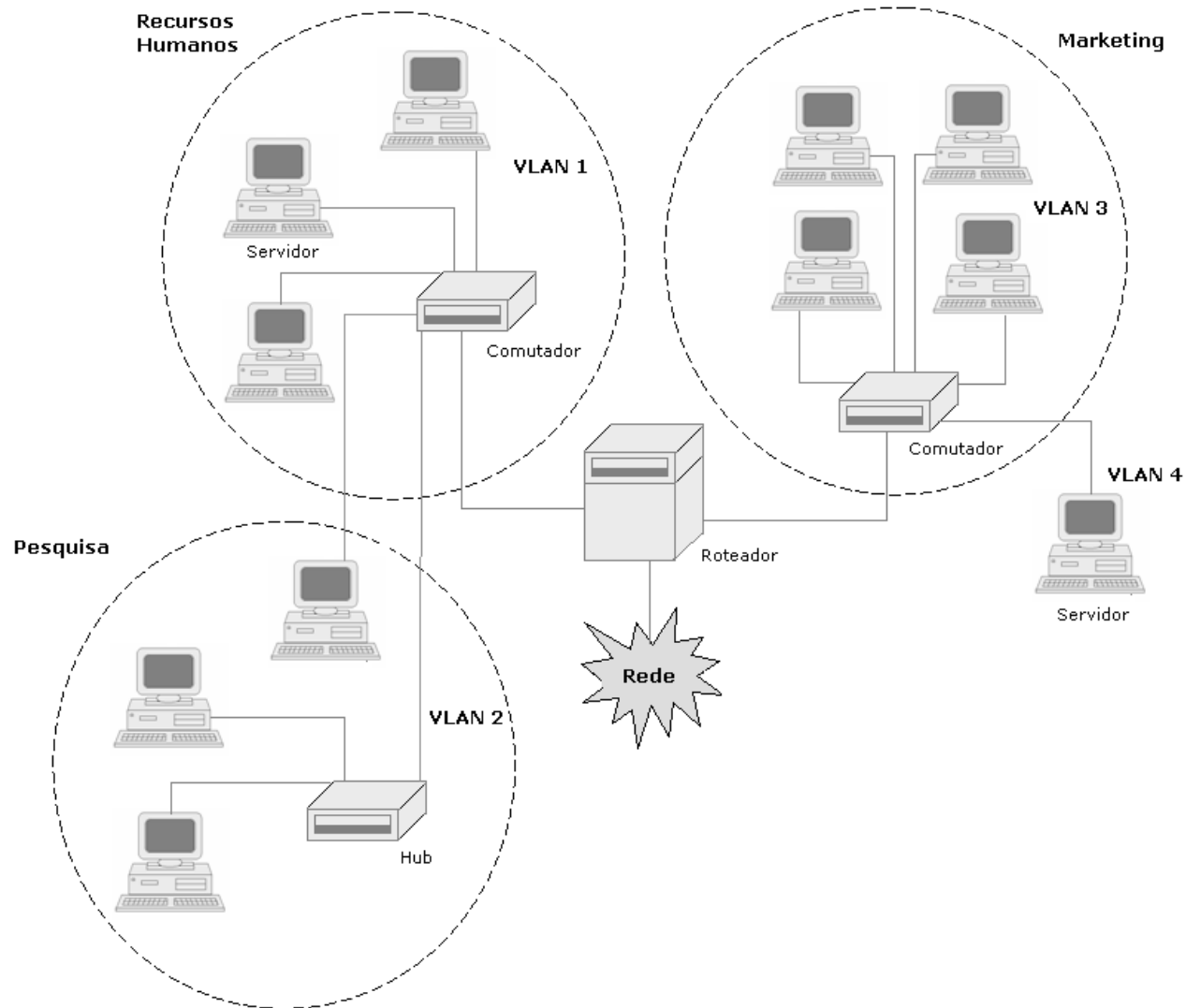


# Redes Locais Virtuais (VLANs)

# VLANs

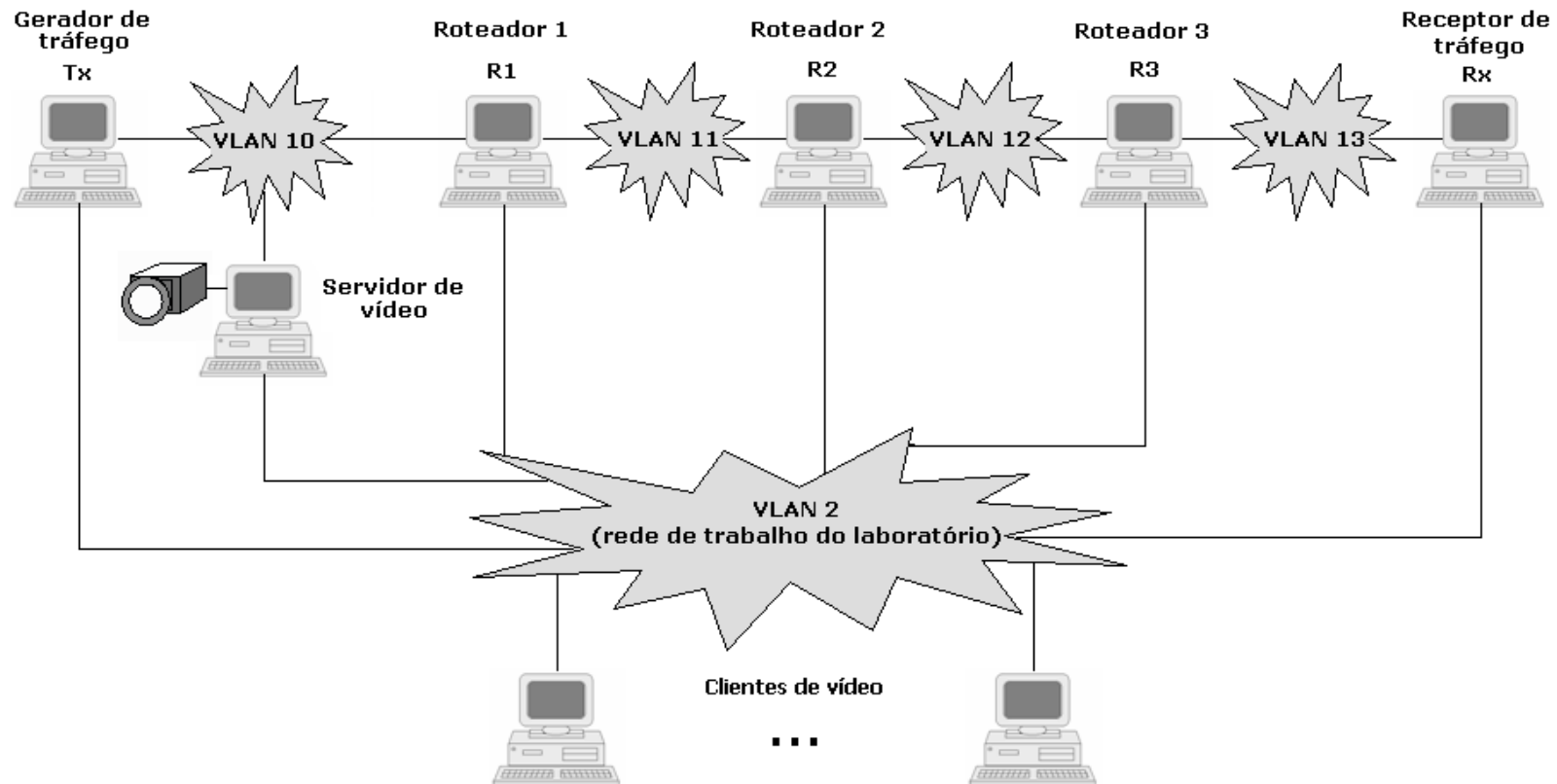
- Geralmente, definidas pelo padrão IEEE 802.1Q
- Objetivo: **Segmentam**, logicamente, uma rede local em **vários domínios de *broadcast***
  - Ao contrário das pontes que ligam redes físicas diferentes em uma rede lógica
- Comutadores filtram os quadros
  - Com base em alguma informação
  - Só encaminham para algumas portas
- É uma solução alternativa ao uso de roteadores para segmentação da rede

# Caso de Uso: Setores de uma Empresa





# Caso de Uso: Experimentos



# Vantagens do Uso de VLANs

- Controle do tráfego *broadcast*
- Segmentação lógica da rede
- Redução de custos e facilidade de gerenciamento
- Independência da topologia física
  - Um usuário pode estar fisicamente em um local conectado a uma rede remota através do comutador mais próximo
- Maior segurança
  - Controle de acesso

# Tipos de VLANs

- VLANs baseadas em
  - Portas
    - Intuitiva, rápida e de fácil gerenciamento
  - Endereço MAC
  - Tipo de protocolo
  - Endereço IP
  - Camadas superiores: aplicações ou serviços
- Padrão IEEE 802.1Q
  - Define somente as VLANs das Camadas 1 e 2

# Exemplo de VLAN por Porta

- Menu de edição de um comutador

```

Edit VLANs
-----
Action: <Add/Modify> VLAN Name:[rede10          ]          Total Entries:5
VLAN Type: 1Q VLAN          VID: 10
          Port  1 to 8 9 to 16 17 to 24 25 26
Membership (U/T/-):  [-----][-----][TUU-----] [-]  [-]          APPLY
-----
VID      VLAN Name          1 to 8 9 to 16 17 to 24 25 26
-----
1        default          -----
2        rede00          UUUUUUUU UUUUUUUU ----- T  U
10       rede10          ----- UU----- T  -
11       rede11          ----- --UU---- -  -
12       rede12          ----- ----UU-- -  -
13       rede13          ----- ----UU -  -

```

# Tratamento de Quadros

- É necessário um comutador com suporte ao padrão IEEE 802.1Q
  - Entretanto, a interoperabilidade é garantida mesmo caso o comutador ou a estação não executem o 802.1Q
- Ao receber um quadro o comutador deve identificar a qual VLAN ele pertence
- Existem três tipos de quadros
  - Sem rótulo (*untagged frames*) - U
  - Com rótulo de prioridade (*priority-tagged frames*)
  - Com rótulo VLAN (*VLAN-tagged frames*) - T

# Tratamento de Quadros

- Internamente, o comutador possui um identificador para cada porta, chamado PVID (Port Vlan ID)
  - Um quadro recebido em uma dada porta é associada ao PVID desta porta
- O relacionamento entre o VID (externo) e o PVID (interno) se dá na base de dados (filtering database)
  - Quadro recebido com identificador diferente do identificador da porta é descartado
- Devido a existência do PVID, é possível a coexistência de dispositivos com e sem suporte a VLANs numa mesma rede

# Tratamento de Quadros

- O encaminhamento de quadros é baseado em três regras
  - Entrada
  - Encaminhamento entre portas
  - Saída



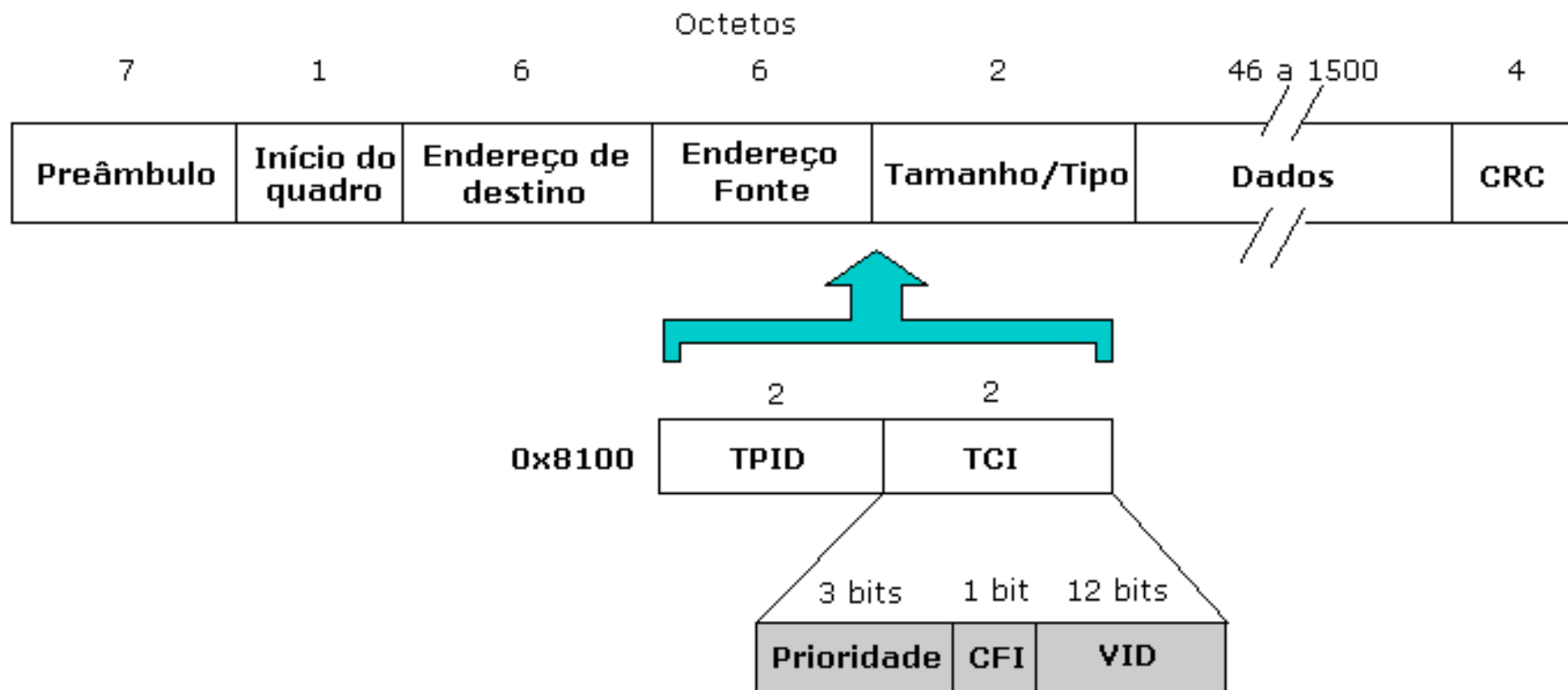


# Marcação de Quadros

- É necessário que os quadros possuam um meio de indicar a qual VLAN pertencem
- Existem dois tipos de marcação
  - Implícita e explícita
    - Quadro pode ser marcado dependendo da porta de entrada
- No caso do quadro Ethernet são adicionados 4 bytes
  - 2 para identificação do tipo de protocolo (TPID)
  - 2 para informações de controle (TCI)
- O VLAN ID possui 12 bits e está contido no campo TCI

# Marcação de Quadros

- Inserção do rótulo 802.1Q no quadro Ethernet



# Material Utilizado

- Notas de aula do Prof. Igor Monteiro Moraes, disponíveis em <http://www2.ic.uff.br/~igor/cursos/redespg>

# Leitura Recomendada

- Capítulo 4 do Livro "*Computer Networks*", Andrew S. Tanenbaum e David J. Wetherall, 5a. Edição, Editora Pearson, 2011
- Capítulo 5 do Livro "*Computer Networking: A Top Down Approach*", 5a. Ed., Jim Kurose and Keith Ross, Editora Pearson, 2010