
Camada de Enlace e Física

Prof. Tiago Semprebom

tisemp@sj.cefetsc.edu.br
www.sj.cefetsc.edu.br/~tisemp

Capítulo 5: Camada de Enlace e Física

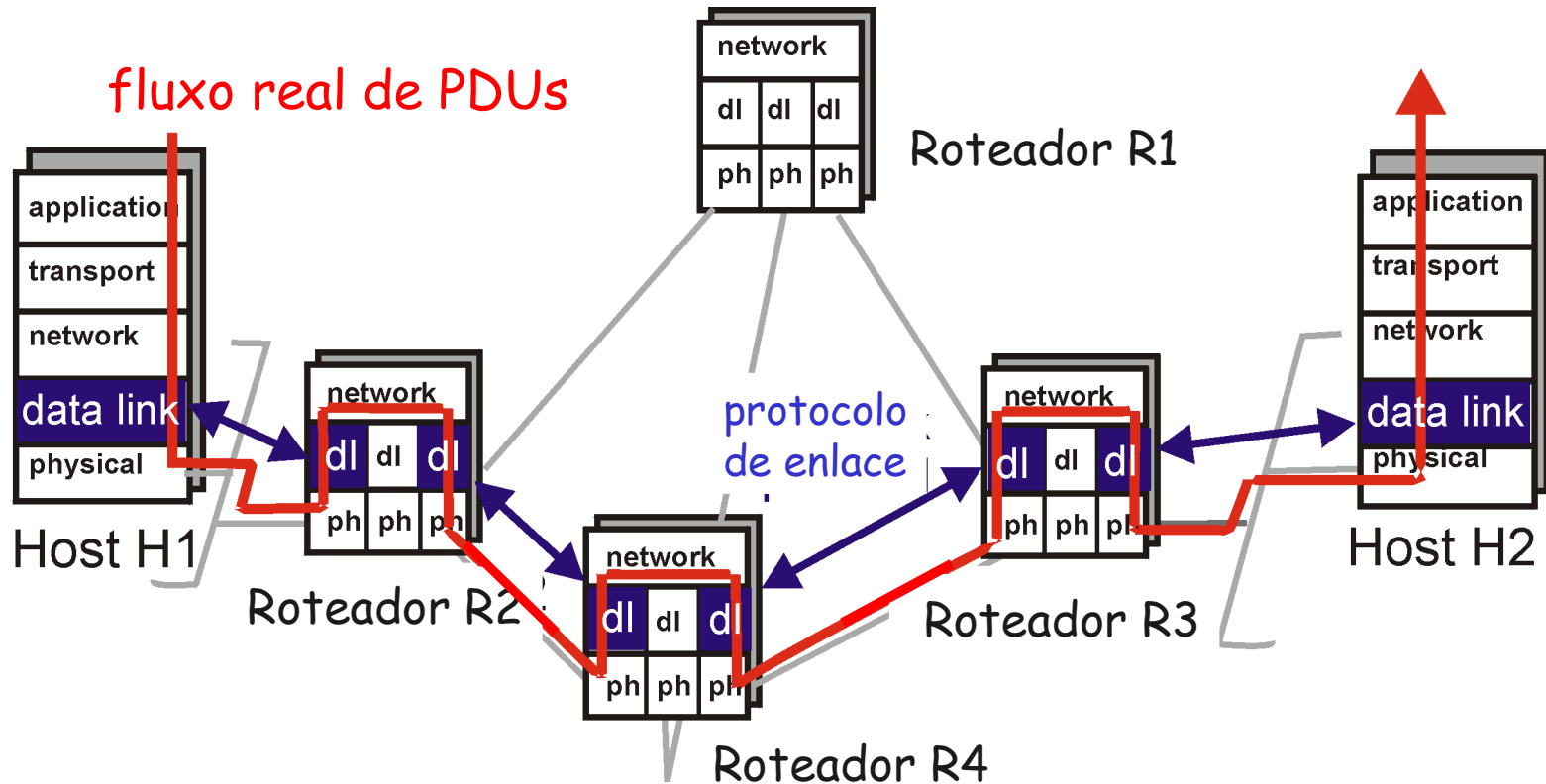
Nossos objetivos:

- ❑ entender os princípios por trás dos serviços da camada de enlace:
 - detecção de erros, correção
 - compartilhando um canal broadcast: acesso múltiplo
 - endereçamento da camada de enlace
 - transferência de dados confiável, controle de fluxo: *já visto!*
- ❑ instanciação e implementação de várias tecnologias da camada de enlace

Visão Geral:

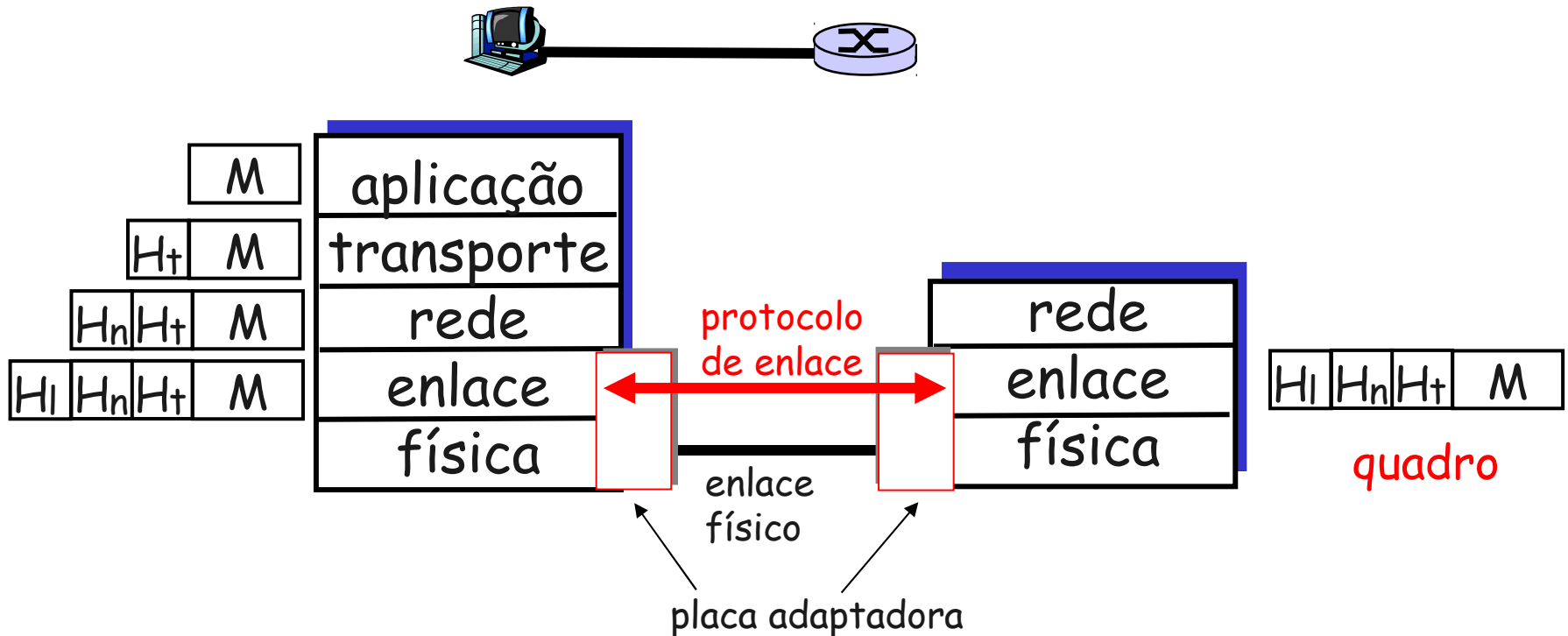
- ❑ serviços da camada de enlace
- ❑ detecção de erros, correção
- ❑ protocolos de acesso múltiplo e LANs
- ❑ endereçamento da camada de enlace, ARP
- ❑ tecnologias específicas da camada de enlace:
 - Ethernet
 - hubs, pontes, switches
 - PPP

Camada de enlace: definindo o contexto



Camada de enlace: definindo o contexto

- dois elementos físicos *fisicamente conectados*:
 - host-roteador, roteador-roteador, host-host
- unidade de dados: *quadro (frame)*



Serviços da Camada de Enlace

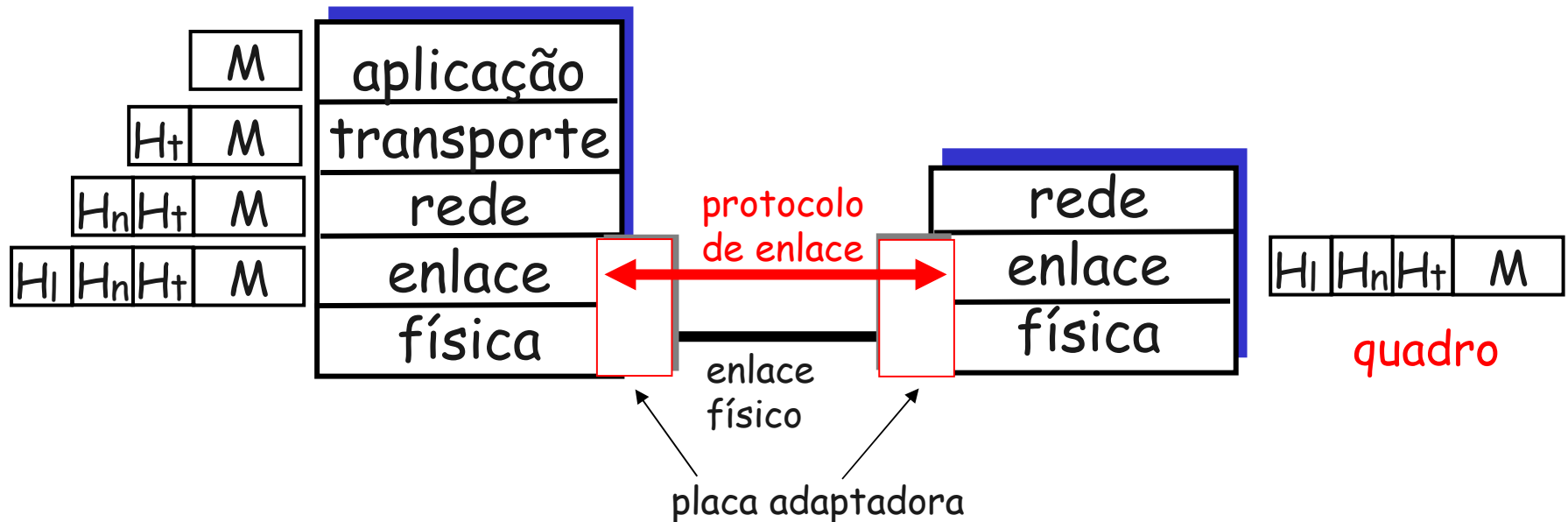
- **Enquadramento, acesso ao enlace:**
 - encapsula datagramas em quadros, acrescentando cabeçalhos e trailer
 - implementa acesso ao canal se o meio é compartilhado
 - 'endereços físicos' usados nos cabeçalhos dos quadros para identificar a fonte e o destino dos quadros
 - diferente do endereço IP !
- **Entrega confiável entre dois equipamentos fisicamente conectados:**
 - já aprendemos como isto deve ser feito (Cam. Transp.)!
 - raramente usado em enlaces com baixa taxa de erro (fibra, alguns tipos de par trançado)
 - enlaces sem-fio (wireless): altas taxas de erro
 - Q: porque prover confiabilidade fim-a-fim na camada de enlace?

Serviços da Camada de Enlace (cont.)

- **Controle de Fluxo:**
 - limitação da transmissão entre transmissor e receptor
- **Detecção de Erros:**
 - erros causados pela atenuação do sinal e por ruídos.
 - o receptor detecta a presença de erros:
 - avisa o transmissor para reenviar o quadro perdido
- **Correção de Erros:**
 - o receptor identifica *e corrige* o bit com erro(s) sem recorrer à retransmissão

Implementação: Camada de Enlace

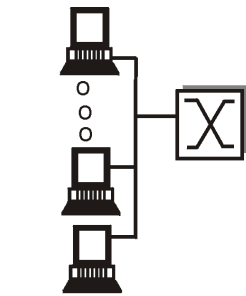
- implementado no "adaptador"
 - ex., placa PCMCIA, placa Ethernet
 - tipicamente inclui: RAM, chips DSP, interface com barramento do host, e interface do enlace



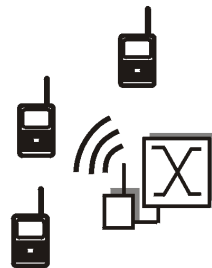
Enlaces de Acceso Múltiplo e Protocolos

Três tipos de enlaces:

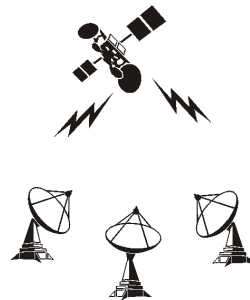
- ponto-a-ponto (fio único, ex. PPP)
- **broadcast** (fio ou meio compartilhado; ex, Ethernet, Wavelan, etc.)



shared wire
(e.g. Ethernet)



shared wireless
(e.g. Wavelan)



satellite



cocktail party

- switched (ex., switched Ethernet, ATM etc)

Protocolos de Acesso Múltiplo

- ❑ canal de comunicação único e compartilhado
- ❑ duas ou mais transmissões pelos nós: interferência
 - apenas um nó pode transmitir com sucesso num dado instante de tempo
- ❑ *protocolo de múltiplo acesso:*
 - algoritmo distribuído que determina como as estações compartilham o canal, isto é, determinam quando cada estação pode transmitir
 - comunicação sobre o compartilhamento do canal deve utilizar o próprio canal!

Protocolos MAC: uma taxonomia

Três grandes classes:

❑ **Particionamento de canal**

- dividem o canal em pedaços menores (compartimentos de tempo, frequência)
- aloca um pedaço para uso exclusivo de cada nó

❑ **Acesso Aleatório**

- permite colisões
- "recuperação" das colisões

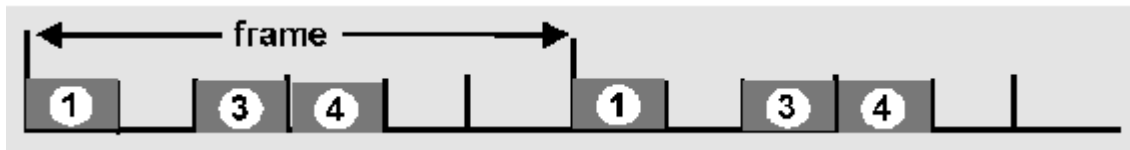
❑ **Passagem de Permissão**

- compartilhamento estritamente coordenado para evitar colisões

Protocolos MAC com Particionamento de Canal: TDMA

TDMA: acesso múltiplo por divisão temporal

- ❑ acesso ao canal é feito por "turnos"
- ❑ cada estação controla um compartimento ("slot") de tamanho fixo (tamanho = tempo de transmissão de pacote) em cada turno
- ❑ compartimentos não usados são desperdiçados
- ❑ exemplo: rede local com 6 estações: 1,3,4 têm pacotes, compartimentos 2,5,6 ficam vazios

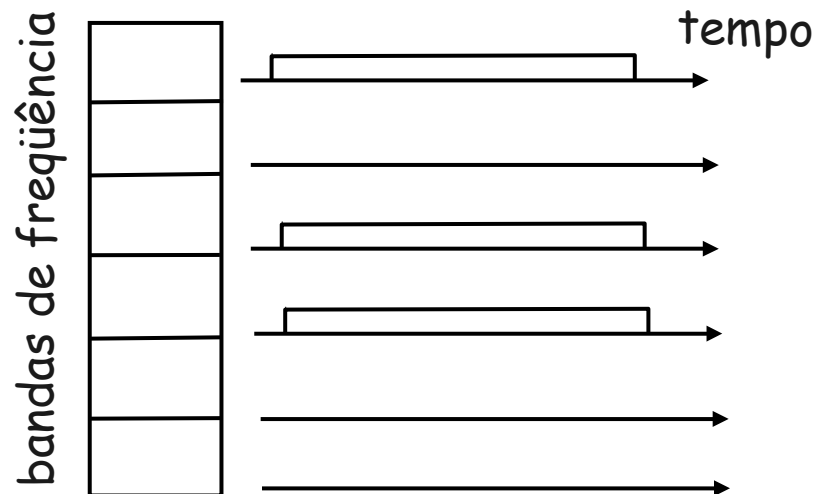


- ❑ TDM (Time Division Multiplexing): channel divided into N time slots, one per user; inefficient with low duty cycle users and at light load.
- ❑ FDM (Frequency Division Multiplexing): frequency subdivided.

Protocolos MAC com Particionamento de Canal: FDMA

FDMA: acesso múltiplo por divisão de frequência

- ❑ o espectro do canal é dividido em bandas de frequência
- ❑ cada estação recebe uma banda de frequência
- ❑ tempo de transmissão não usado nas bandas de frequência é desperdiçado
- ❑ exemplo: rede local com 6 estações: 1,3,4 têm pacotes, as bandas de frequência 2,5,6 ficam vazias

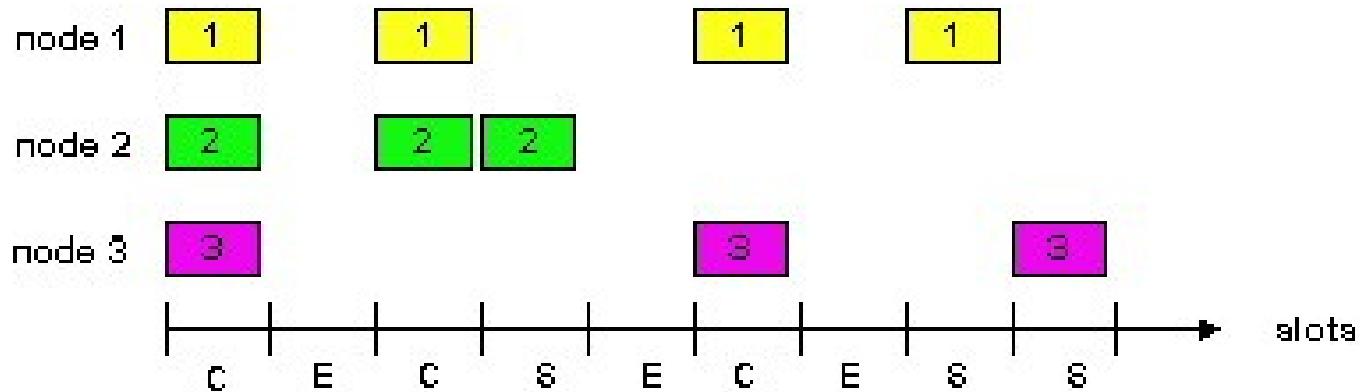


Protocolos de Acesso Aleatório

- Quando o nó tem um pacote a enviar:
 - transmite com toda a taxa do canal R.
 - não há uma regra de coordenação *a priori* entre os nós
- dois ou mais nós transmitindo -> "colisão",
- **Protocolo MAC de acesso aleatório** especifica:
 - como detectar colisões
 - como as estações se recuperam das colisões (ex., via retransmissões atrasadas)
- Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
 - slotted ALOHA
 - ALOHA
 - CSMA e CSMA/CD

Slotted Aloha

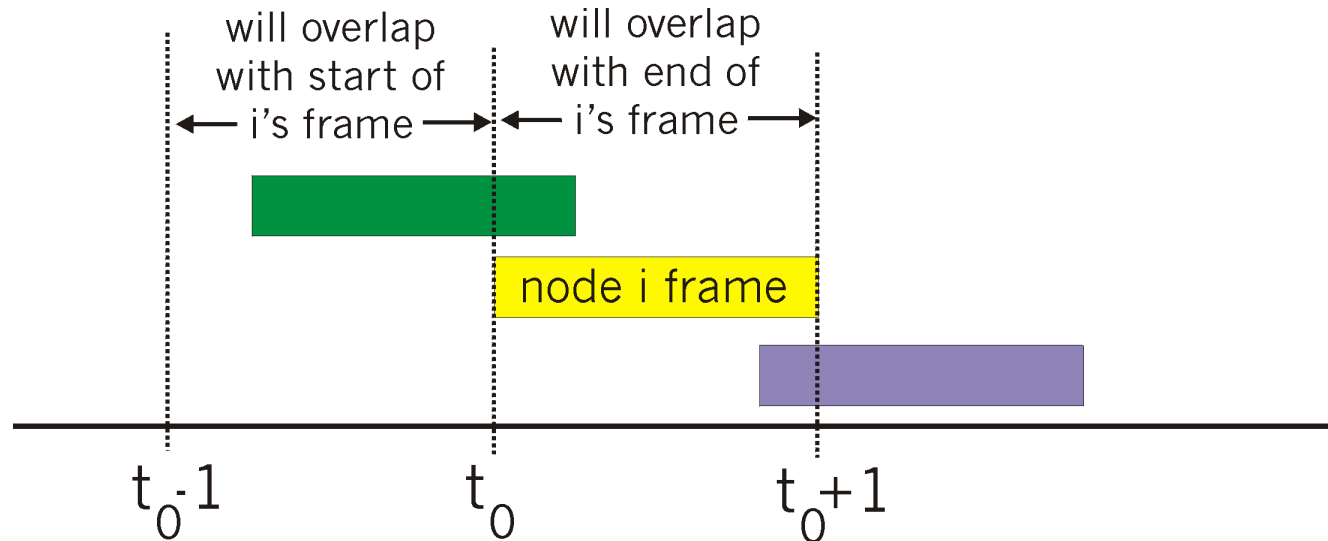
- tempo é dividido em compartimentos de tamanho igual (= tempo de transmissão de um pacote)
- nó com pacote pronto: transmite no início do próximo compartimento
- se houver colisão: retransmite o pacote nos futuros compartimentos com probabilidade p , até que consiga enviar.



Compartimentos: Sucesso (S), Colisão (C), Vazio (E)

ALOHA Puro (unslotted)

- unslotted Aloha: operação mais simples, não há sincronização
- pacote necessita transmissão:
 - enviar sem esperar pelo início de um compartimento
- a probabilidade de colisão aumenta:
 - pacote enviado em t_0 colide com outros pacotes enviados em $[t_0 - 1, t_0 + 1]$



CSMA: Carrier Sense Multiple Access

CSMA: escuta antes de transmitir:

- ❑ Se o canal parece vazio: transmite o pacote
- ❑ Se o canal está ocupado, adia a transmissão
 - **CSMA Persistente:** tenta outra vez imediatamente com probabilidade p quando o canal se torna livre (pode provocar instabilidade) (versão com slot qdo $p \ll 1$)
 - **CSMA Não-persistente:** tenta novamente após um intervalo aleatório
- ❑ analogia humana: não interrompa os outros!

Colisões no CSMA

colisões podem ocorrer:

o atraso de propagação implica que dois nós podem não ouvir as transmissões de cada outro

colisão:

todo o tempo de transmissão do pacote é desperdiçado

nota:

papel da distância e do atraso de propagação na determinação da probabilidade de colisão.

CSMA/CD (Detecção de Colisão)

CSMA/CD: detecção de portadora, diferimento como no CSMA

- colisões *detectadas* num tempo mais curto
- transmissões com colisões são interrompidas, reduzindo o desperdício do canal
- retransmissões persistentes ou não-persistentes
- detecção de colisão:
 - fácil em LANs cabeadas: medição da intensidade do sinal, comparação dos sinais transmitidos e recebidos
 - difícil em LANs sem fio: receptor desligado enquanto transmitindo
- analogia humana: o "bom-de-papo" educado

Protocolos MAC com Passagem de Permissão

Protocolos MAC com particionamento de canais:

- compartilham o canal eficientemente quando a carga é alta e bem distribuída
- ineficiente nas cargas baixas: atraso no acesso ao canal. A estação consegue uma banda de $1/N$ da capacidade do canal, mesmo que haja apenas 1 nó ativo!

Protocolos MAC de acesso aleatório

- eficiente nas cargas baixas: um único nó pode usar todo o canal
- cargas altas: excesso de colisões

Protocolos de passagem de permissão

buscam o melhor dos dois mundos!

→ Determinismo

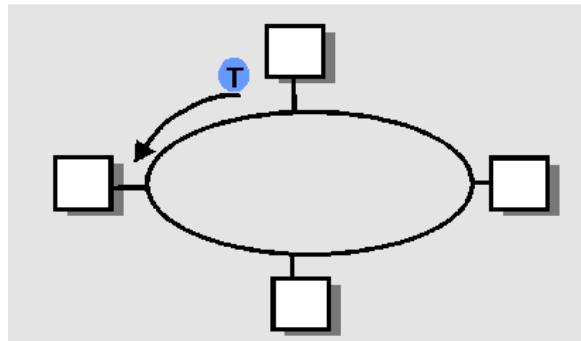
Protocolos MAC com Passagem de Permissão

Polling:

- ❑ nó mestre "convida" os escravos a transmitirem um de cada vez
- ❑ Mensagens Request to Send e Clear to Send
- ❑ problemas:
 - polling overhead
 - latência
 - ponto único de falha (mestre)

Token passing:

- ❑ controla um **token** passado de um nó a outro sequencialmente.
- ❑ mensagem token
- ❑ problemas:
 - token overhead
 - latência
 - ponto único de falha (token)



Endereços de LAN e ARP

Endereços IP de 32-bit:

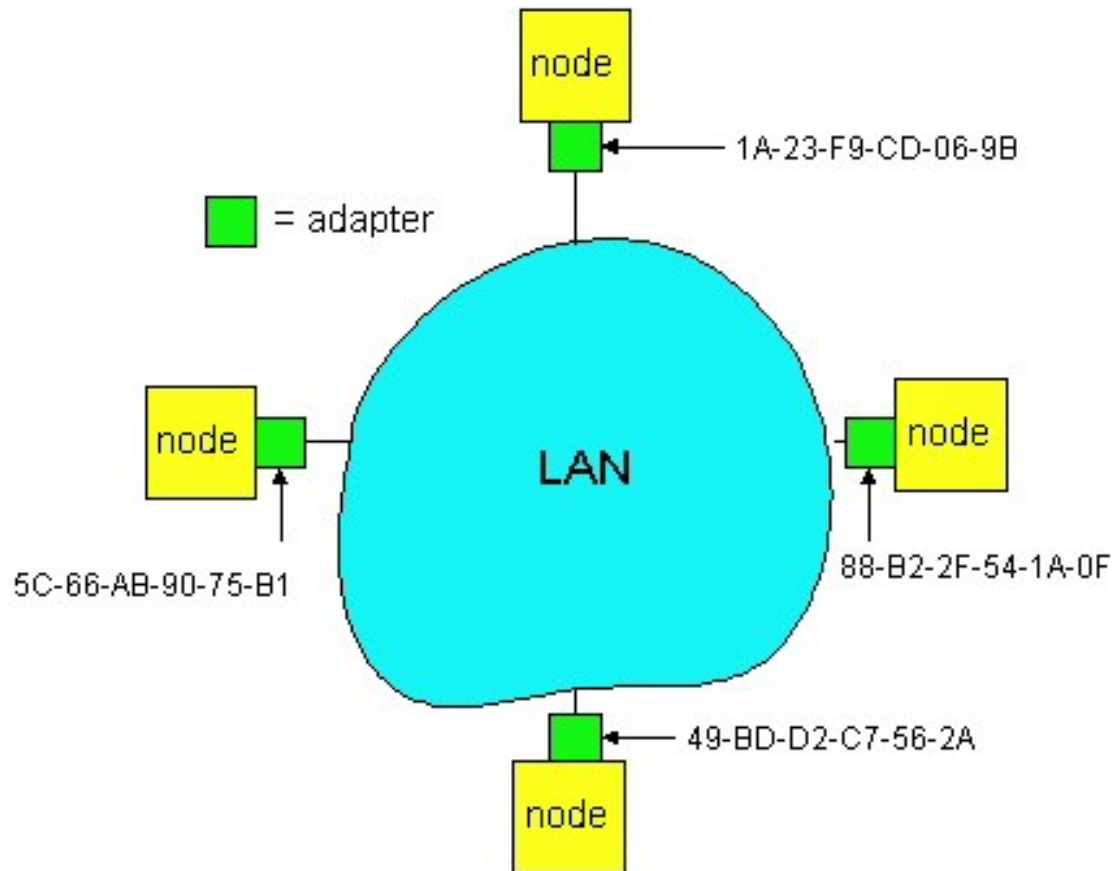
- ❑ endereços da *camada de rede*
- ❑ usados para levar o datagrama até a rede de destino (lembre da definição de rede IP)

Endereço de LAN (ou MAC ou físico):

- ❑ usado para levar o datagrama de uma interface física a outra fisicamente conectada com a primeira (isto é, na mesma rede)
- ❑ Endereços MAC com 48 bits (na maioria das LANs) gravado na memória fixa (ROM) do adaptador de rede

Endereços de LAN e ARP

Cada adaptador numa LAN tem um único endereço de LAN



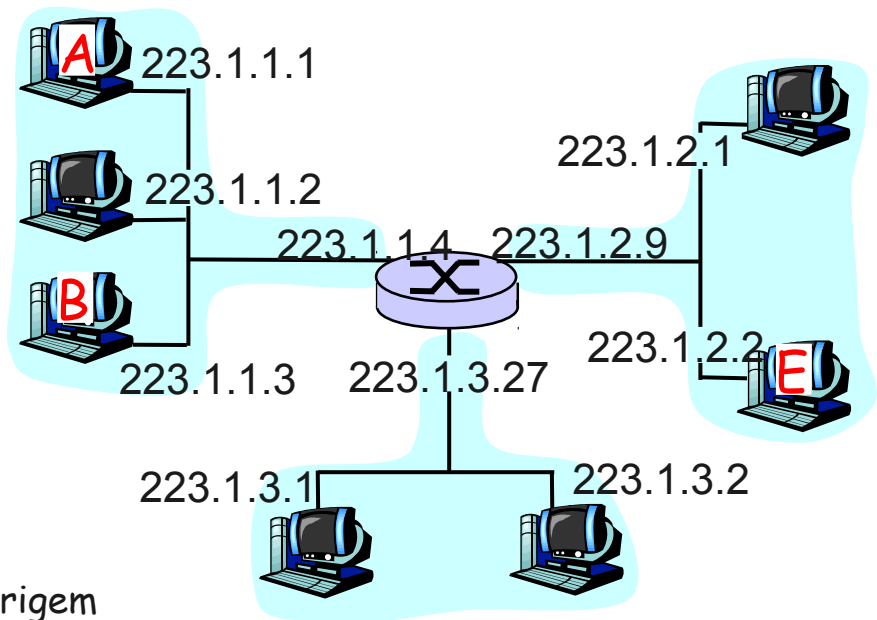
Endereços de LAN (mais)

- ❑ A alocação de endereços MAC é administrada pelo IEEE
- ❑ O fabricante compra porções do espaço de endereço MAC (para assegurar a unicidade)
- ❑ Analogia:
 - (a) endereço MAC: semelhante ao número do CPF
 - (b) endereço IP: semelhante a um endereço postal
- ❑ endereçamento MAC é "flat" => portabilidade
 - é possível mover uma placa de LAN de uma rede para outra sem reconfiguração de endereço MAC
- ❑ endereçamento IP "hierárquico" => NÃO portátil
 - depende da rede na qual se está ligado

Lembre a discussão anterior sobre roteamento

Começando em A, dado que o datagrama está endereçado para B (endereço IP):

- procure rede.endereço de B, encontre B em alguma rede, no caso igual à rede de A
- **camada de enlace envia datagrama para B dentro de um quadro da camada de enlace**



endereço de origem e destino do quadro

endereço de origem e destino do pacote

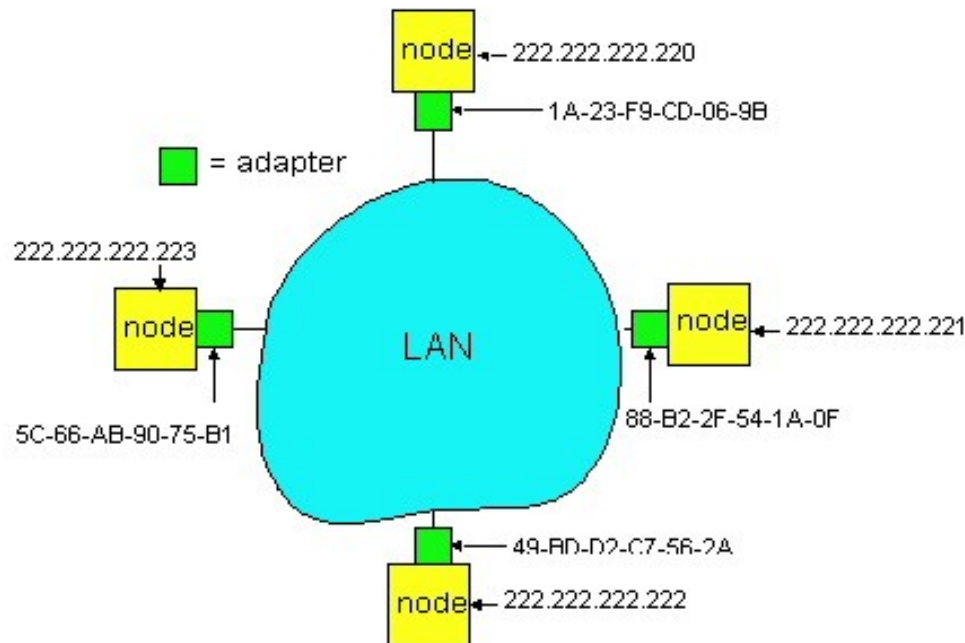


← datagrama →

← quadro →

ARP: Address Resolution Protocol (Protocolo de Resolução de Endereços)

Questão: como determinar o endereço MAC de B dado o endereço IP de B?



□ Cada nó IP (Host, Roteador) numa LAN tem um módulo e uma tabela **ARP**

□ Tabela ARP: mapeamento de endereços IP/MAC para alguns nós da LAN

< endereço IP; endereço MAC; TTL >

< >

○ TTL (Time To Live): tempo depois do qual o mapeamento de endereços será esquecido (tipicamente 20 min)

Protocolo ARP

- ❑ A conhece o endereço IP de B, quer aprender o endereço físico de B
- ❑ A envia em **broadcast** um pacote ARP de consulta contendo o endereço IP de B
 - todas as máquinas na LAN recebem a consulta ARP
- ❑ B recebe o pacote ARP, responde a A com o seu (de B) endereço de camada física
- ❑ A armazena os pares de endereço IP-físico até que a informação se torne obsoleta (esgota a temporização)
 - soft state: informação que desaparece com o tempo se não for re-atualizada

A camada de Enlace de Dados (Data Link Layer)

- Geralmente decomposta em 2 subcamadas (proposta IEEE):

MAC (Medium Access Control): controle de acesso ao meio
(muito importante em redes de difusão)

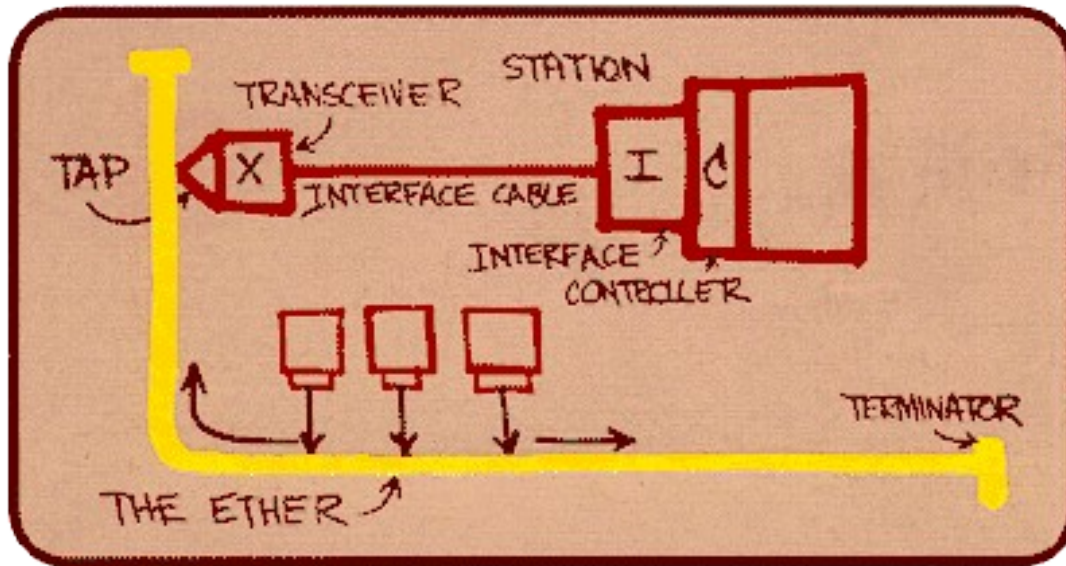
LLC (Logical Link Control): controle lógico de enlace, faz
todas as demais funções e oferece serviços à camada logo acima

- IEEE 802.2 - LLC
- IEEE 802.3 – 1-Persistente CSMA-CD (Ethernet ->Xerox)
- IEEE 802.4 – Token Bus (Físico:Barramento, Lógico:Anel)
- IEEE 802.5 – Token Ring – Passagem de Ficha em Anel (IBM)

Ethernet

Tecnologia de rede local "dominante" :

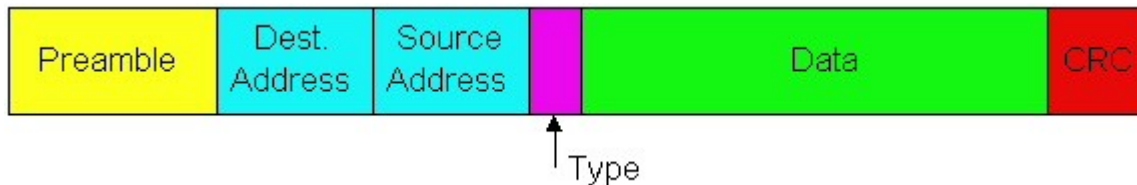
- ❑ barato R\$30 por 100Mbs!
- ❑ primeira tecnologia de LAN largamente usada
- ❑ Mais simples, e mais barata que LANs com token e ATM
- ❑ Velocidade crescente: 10, 100, 1000 Mbps



Esboço da Ethernet
por Bob Metcalf

Estrutura do Quadro Ethernet

Adaptador do transmissor encapsula o datagrama IP (ou outro pacote de protocolo da camada de rede) num **quadro Ethernet**

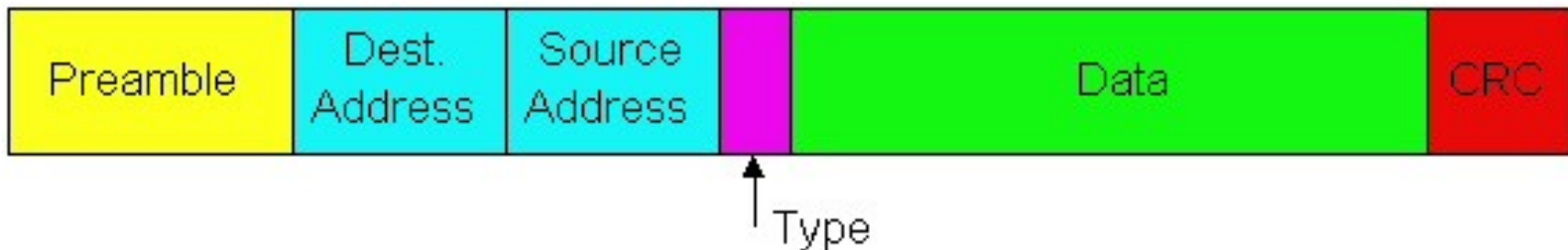


Preâmbulo:

- ❑ 7 bytes com padrão 10101010 seguido por um byte com padrão 10101011
- ❑ usado para sincronizar transmissor e receptor

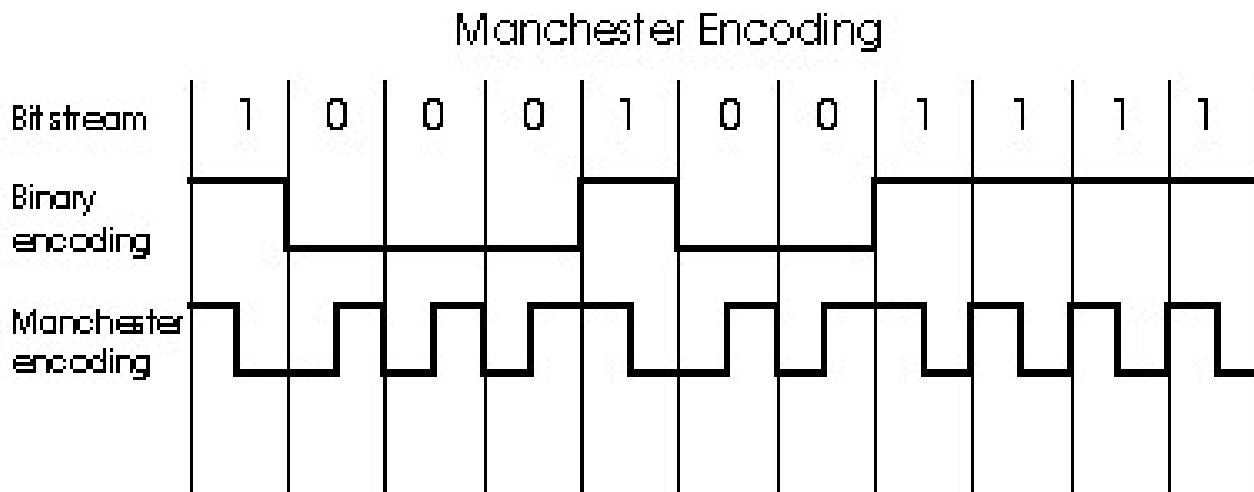
Estrutura do Quadro Ethernet (mais)

- ❑ **Endereços:** 6 bytes, quadro é recebido por todos os adaptadores e descartado se o endereço do quadro não coincide com o endereço do adaptador
- ❑ **Tipo:** indica o protocolo da camada superior, geralmente é o protocolo IP mas outros podem ser suportados tais como Novell IPX e AppleTalk)
- ❑ **CRC:** verificado no receptor, se um erro é detectado, o quadro é simplesmente descartado.



Codificação Manchester de Banda Básica

- ❑ Banda básica significa que não se usa modulação de portadora; ao invés disto, bits são codificados usando codificação Manchester e transmitidos diretamente, modificando a voltagem de sinal de corrente contínua
- ❑ Codificação Manchester garante que ocorra uma transição de voltagem a cada intervalo de bit, ajudando sincronização entre relógios do remetente e receptor



Ethernet: usa CSMA/CD

A: examina canal, **se** em silêncio

então {

transmite e monitora o canal;

Se detecta outra transmissão

então {

aborta e envia sinal de "jam";

atualiza número de colisões;

espera como exigido pelo algoritmo "exponential backoff";

vá para A

}

senão {quadro transmitido; zera contador de colisões}

}

senão {espera até terminar a transmissão em curso **vá para A**}

Ethernet CSMA/CD (mais)

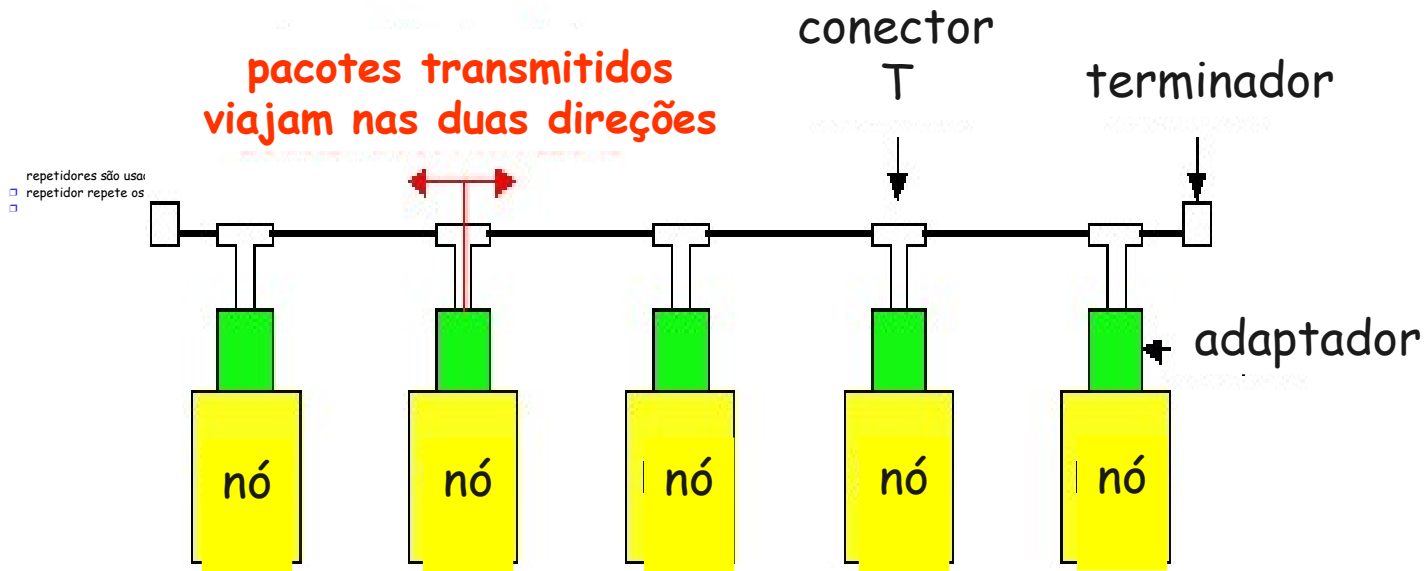
Sinal "Jam": garante que todos os outros transmissores estão cientes da colisão; 48 bits;

"Exponential Backoff":

- *Objetivo*: adaptar tentativas de retransmissão para carga atual da rede
 - carga pesada: espera aleatória será mais longa
- primeira colisão: escolha K entre $\{0,1\}$; espera é K tempo pré-definido
- após a segunda colisão: escolha K entre $\{0,1,2,3\}$...
- após 10 ou mais colisões, escolha K entre $\{0,1,2,3,4, \dots, 1023\}$

Tecnologias Ethernet: 10Base2

- 10: 10Mbps; 2: comprimento máximo do cabo de 200 metros (de fato, 186 metros)
- ▣ cabo coaxial fino numa topologia em barramento

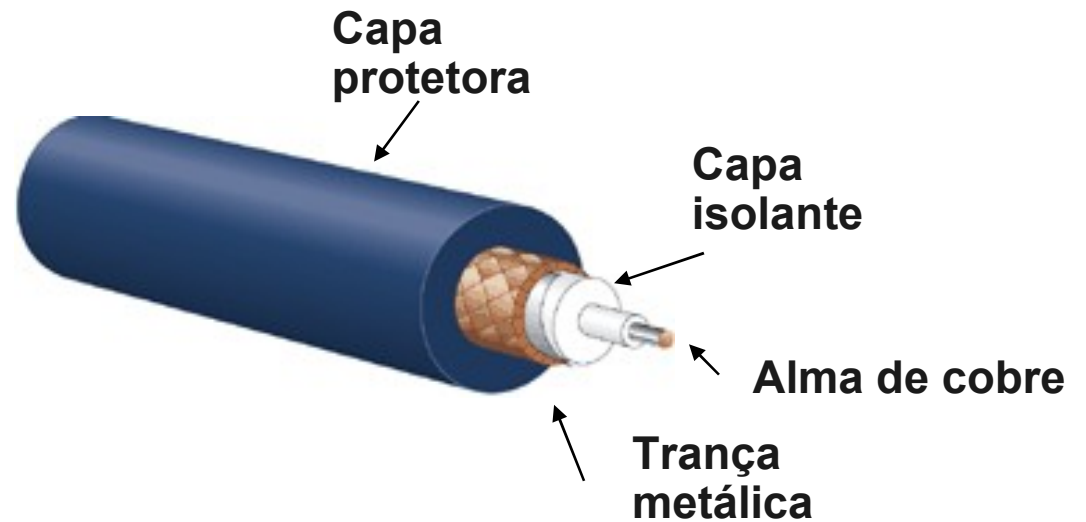


Cabos Coaxiais

- Constituídos de 2 condutores concêntricos separados por isolante

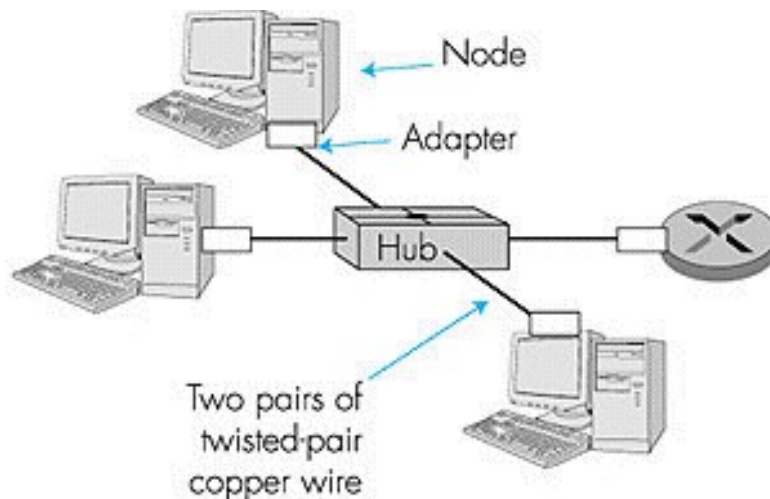


Cabo com conectores BNC



10BaseT e 100BaseT

- ❑ Taxas de transmissão de 10 e 100 Mbps; este último é chamado de "fast ethernet"
- ❑ T significa Par Trançado
- ❑ Usa concentrador ("hub") ao qual os nós estão ligados por cabos individuais de 2 pares trançados, apresentando, portanto uma "topologia em estrela"
- ❑ CSMA/CD implementado no "hub"



Par Trançado (Twisted Pair)

- forma mais barata e clássica de conexão
- cabo composto de "n" pares de fios de cobre isolados e arrançados de forma helicoidal
- Efeito do arranjo helicoidal => reduzir induções eletromagnéticas parasitas => fios paralelos formam antena !
- Categoria 3: telefone, LAN
2 pares



Conector RJ45

- Categoria 5: isolamento teflon, LAN
usado em 100BaseT

10BaseT e 100BaseT (mais)

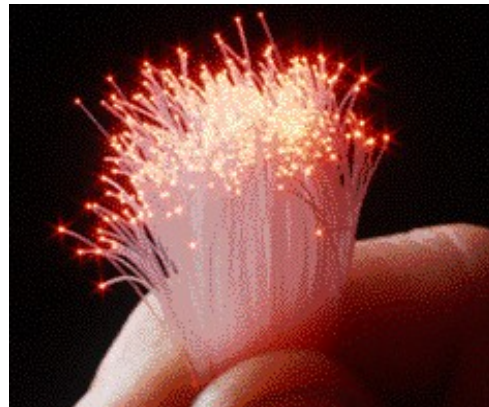
- ❑ Máxima distância do nó ao hub é de 100 metros
- ❑ Hub pode desconectar um adaptador que não pára de transmitir ("jabbering adapter")
- ❑ Hub pode coletar e monitorar informações e estatísticas para apresentação ao administradores da LAN

Gbit Ethernet

- ❑ Usa formato do quadro Ethernet padrão
- ❑ Admite enlaces ponto-a-ponto e canais de difusão compartilhados
- ❑ Em modo compartilhado, usa-se CSMA/CD; para ser eficiente, as distâncias entre os nós devem ser curtas (poucos metros)
- ❑ Full-Duplex em 1 Gbps para enlaces ponto-a-ponto

Fibras Óticas

- Sinais binários transmitidos como impulsos luminosos:
 - lógico 1 => presença de luz
 - lógico 0 => ausência de luz
- Princípio de transmissão na fibra:
 - ângulo de incidência grande => reflexão e refração
 - ângulo de incidência pequeno => reflexão total



Feixe de fibras óticas

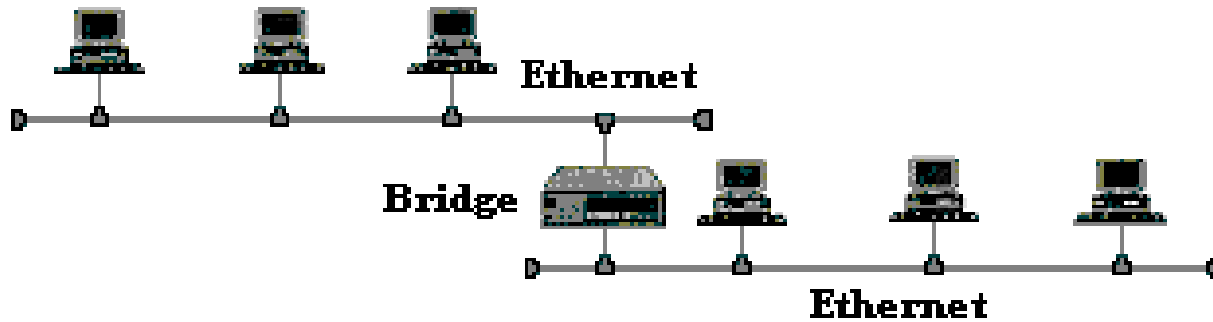
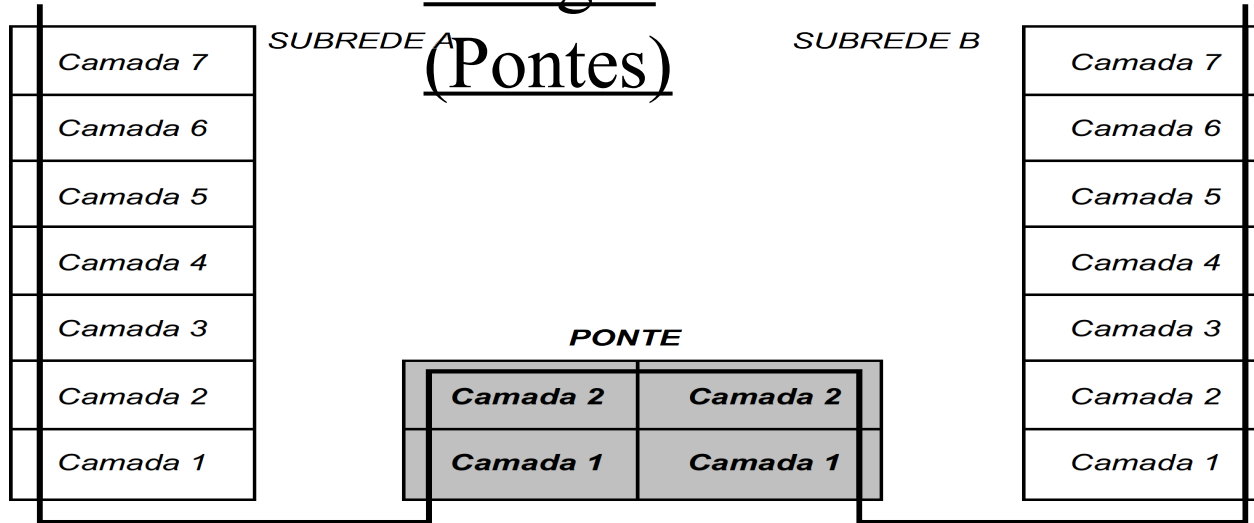
Interconexão de redes

- Problemas da interconexão:
 - Como realizar o roteamento entre estações em sub-redes diferentes ?
 - Como interconectar sub-redes que usam protocolos diferentes e incompatíveis ?
 - ex. IBM Token-Ring x Ethernet
 - Como interconectar sub-redes com arquiteturas diferentes ?
 - (ex.: ISO/OSI x TCP/IP)

As diferentes possibilidades de interconexão

- **Repetidores (Repeaters)**: operam a nível da camada física, reforçando sinais elétricos no meio.
- **Pontes (Bridges)**: operam a nível da camada de enlace, armazenando, modificando e retransmitindo quadros.
- **Passarelas (Gateways)**, classificados em 2 tipos:
 - **Gateway conversor de meio** (media-conversion gateway), também chamado **Roteador (Router)**: opera a nível da camada de rede e pode realizar funções de roteamento, além das funções das pontes.
 - **Gateway tradutor de protocolos** (protocol-translation gateway), que chamaremos aqui simplesmente de **Gateway**: opera a nível de camada de aplicação e permite interligar subredes completamente diferentes.

Bridges (Pontes)



Gateways (Passarelas)

REDE MAP (OSI)

Aplicação
Apresentação
Sessão
Transporte
Rede
Enlace
Física

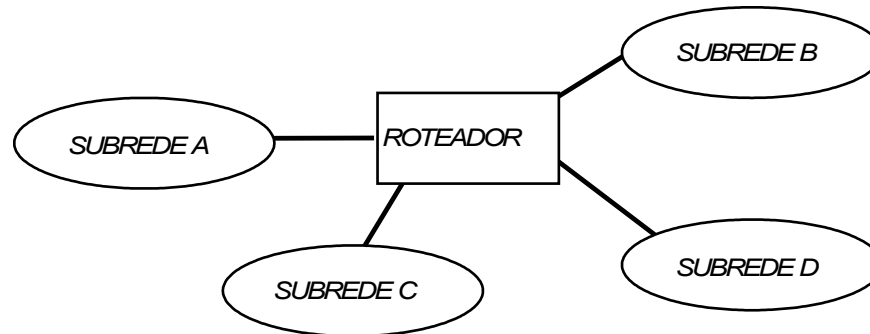
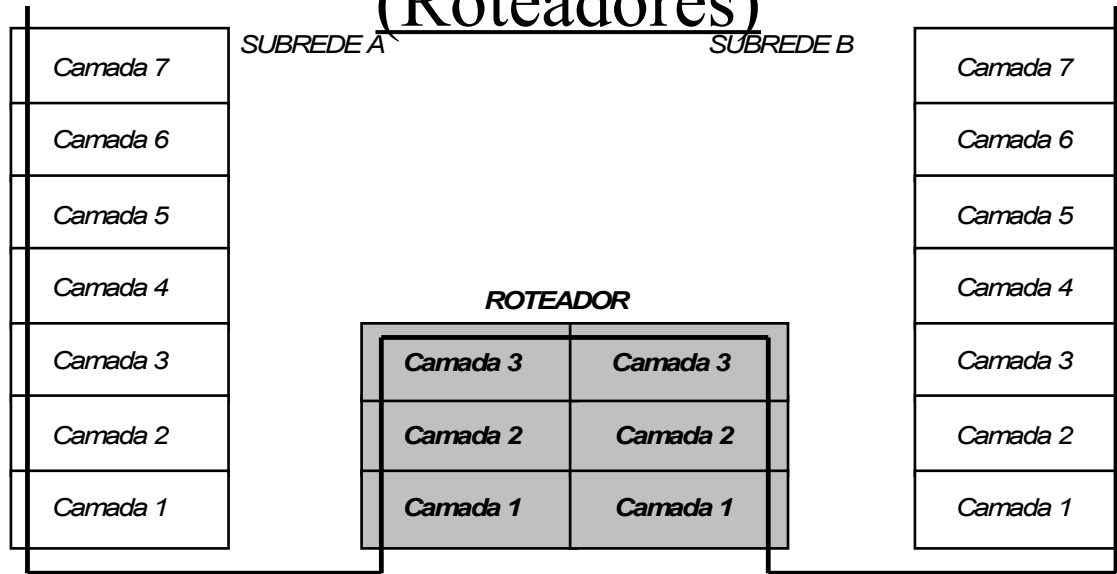
GATEWAY

TRADUTOR	
Aplicação	Usuário
Apresentação	serviços NAU
Sessão	Fluxo Dados
Transporte	Controle Transmissão
Rede	Controle Caminho
Enlace	Controle Enlace
Física	Ligação Física

REDE SNA

Usuário
serviços NAU
Fluxo Dados
Controle Transmissão
Controle Caminho
Controle Enlace
Ligação Física

Routers (Roteadores)



Hubs, Pontes e Comutadores

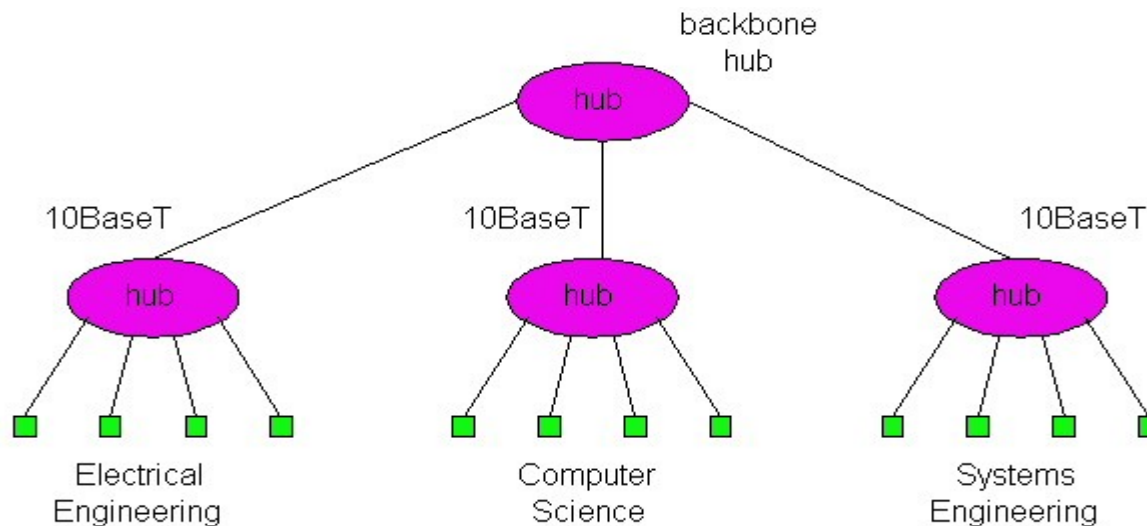
- ❑ Usados para estender as características das redes locais: cobertura geográfica, número de nós, funcionalidade administrativa, etc.

- ❑ Diferem entre si em respeito a:
 - isolamento de domínios de colisão
 - camada em que operam

- ❑ Diferentes de roteadores
 - “plug and play”
 - não provêem roteamento ótimo de pacotes IP

Hubs

- Dispositivos da camada física: basicamente são repetidores operando ao nível de bit: repete os bits recebidos numa interface para as demais interfaces
- Hubs podem ser dispostos numa hierarquia (ou **projeto de múltiplos níveis**), com um hub **backbone** na raiz



Hubs (cont)

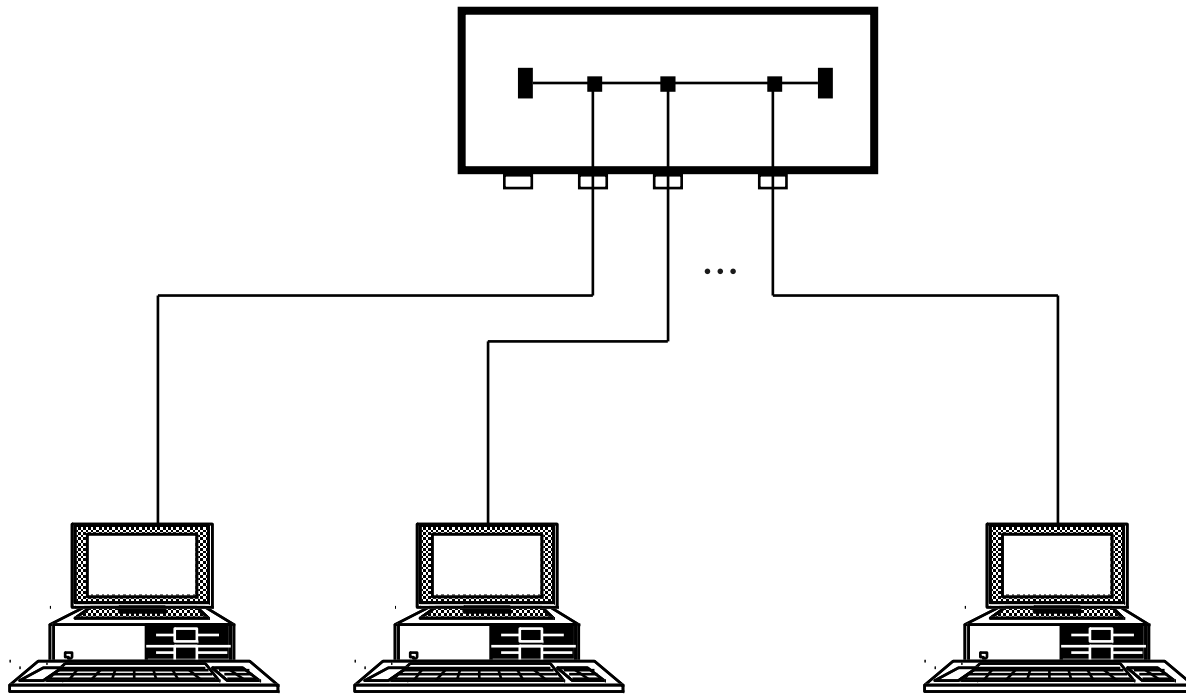
□ Vantagens de Hubs:

- Dispositivos simples, baratos
- Configuração em múltiplos níveis provê degradação suave: porções da rede local continuam a operar se um dos hubs parar de funcionar
- Estende a distância máxima entre pares de nós (100m por Hub)

□ Desvantagens de Hubs:

- Não se pode misturar tipos diferentes de Ethernet (p.ex., 10BaseT and 100BaseT)
- **não** isolam domínios de colisão: um nó pode colidir com qualquer outro nó residindo em qualquer segmento da rede local

Hubs



Pontes ("Bridges")

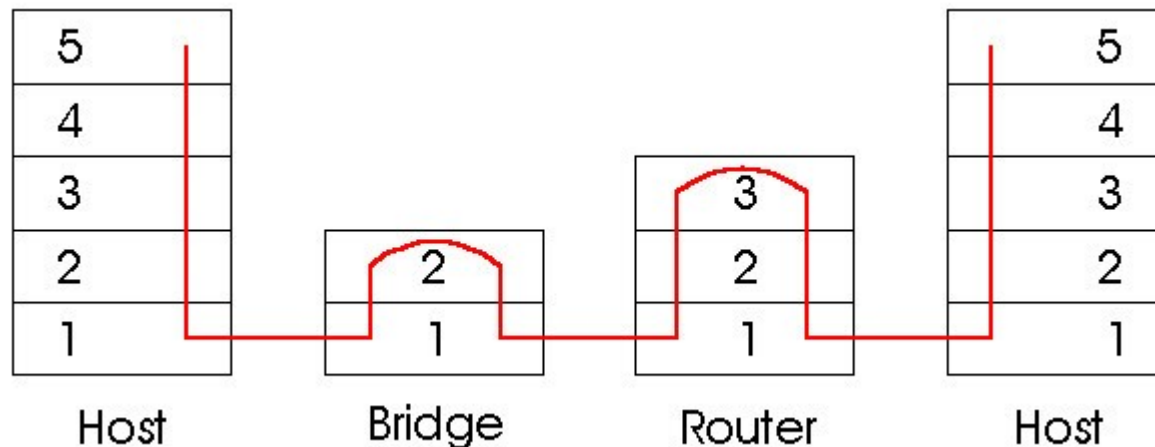
- **Dispositivos da camada de enlace:** operam em quadros Ethernet, examinando o cabeçalho do quadro, e reencaminhando seletivamente um quadro com base no seu endereço de destino
- **Ponte isola domínios de colisão** pois ela armazena e reencaminha os quadros (resulta em aumento de vazão máxima total)
- **Pode interligar tipos diferentes** de Ethernet pois é um dispositivo "armazena e reencaminha"
- **Transparente:** não requer nenhuma modificação aos adaptadores dos nós da rede local

Pontes ("Bridges")

- Pontes são elementos inteligentes bidirecionais: escutam todas as mensagens enviadas em cada subrede
- para cada mensagem, endereço de destino é verificado em uma tabela que indica em qual subrede este se encontra
- se endereço de destino está na mesma subrede de origem, ponte ignora a mensagem
- se endereço de destino está na outra subrede, ponte retransmite a mensagem na subrede destino

Pontes x Roteadores

- Ambos são dispositivos "armazena e reencaminha", porém Roteadores são dispositivos da Camada de Rede (examinam cabeçalhos da camada de rede) enquanto Pontes são dispositivos da Camada de Enlace
- Roteadores mantêm tabelas de rotas e implementam algoritmos de roteamento; pontes mantêm tabelas de filtragem e implementam filtragem



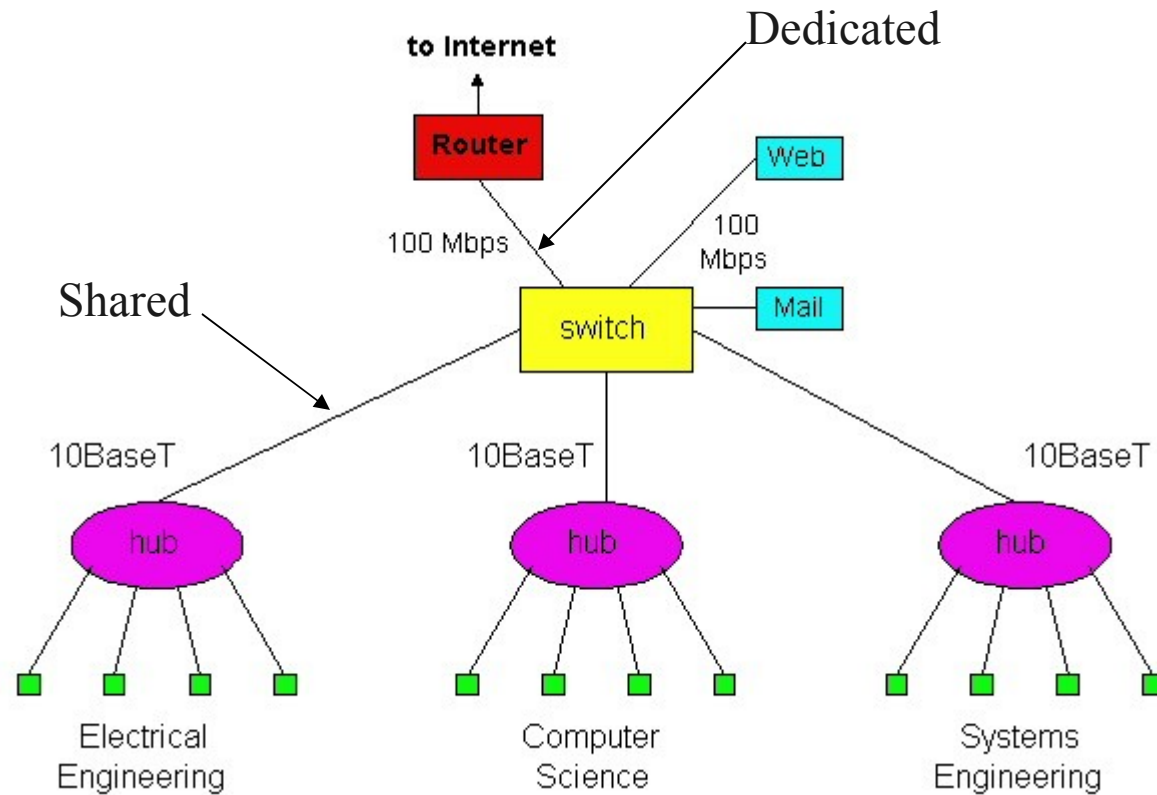
Pontes x Roteadores (cont)

- ❑ Operação de uma Ponte é mais simples requerendo menor capacidade de processamento
- ❑ Roteadores: Requerem configuração de endereços IP (não são "plug and play")
 - Requerem maior capacidade de processamento
- ❑ Pontes são melhores em redes pequenas (algumas centenas de nós) enquanto roteadores são necessários em grandes redes (milhares de nós)

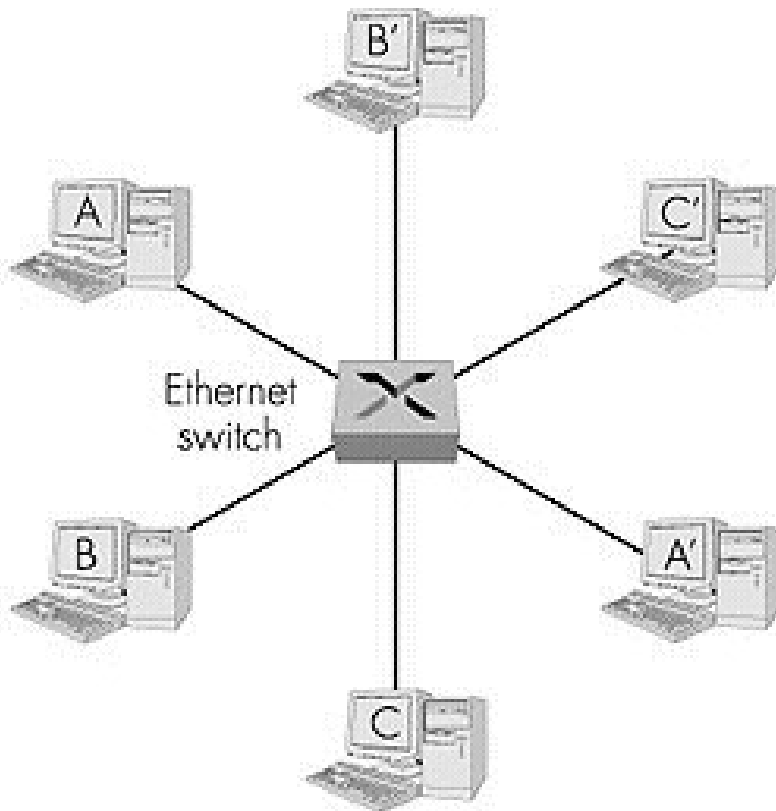
Comutadores Ethernet

- ❑ Um comutador Ethernet ("Ethernet switch") é um dispositivo que estende funções normais de ponte para incluir "conexões dedicadas" ponto-a-ponto
- ❑ Uma estação ligada a um comutador através de uma conexão dedicada ponto-a-ponto sempre detecta que o meio está ocioso: não haverá colisões nunca!
- ❑ Comutadores Ethernet provêem combinações de conexões compartilhadas/dedicadas, a 10/100/1000 Mbps

Uso de um Computador Ethernet



Exemplo de Computador Ethernet



- A pode transmitir para A'
 - enquanto B transmite para B' e
 - C transmite para C',
 - simultaneamente.
-
- A vazão agregada corresponde às três transferências simultâneas.
-
- Por exemplo, 3×10 Mbps.

Switchers (Comutadores)

