



Redes de Computadores

Camada de Enlace

Prof. Me. Ricardo Girnis Tombi

Introdução

Entre os serviços que podem ser oferecidos por um protocolo da camada de enlace, estão:

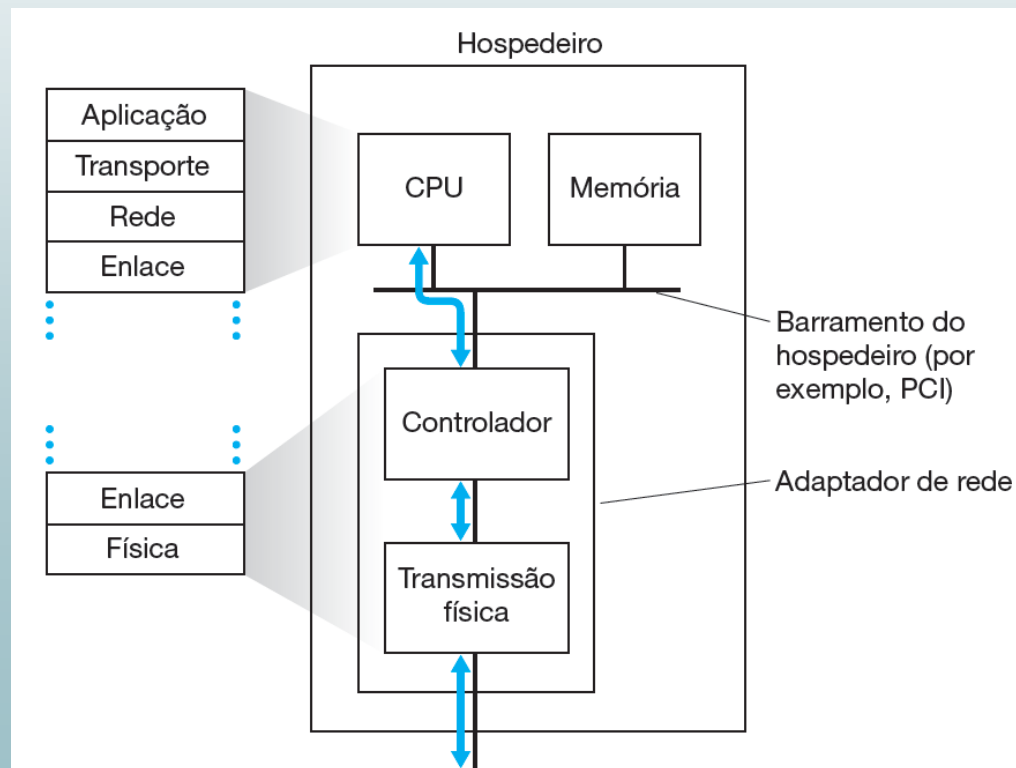
- Enquadramento de dados.
- Acesso ao enlace.
- Entrega confiável.
- Detecção e correção de erros.

Onde a camada de enlace é implementada?

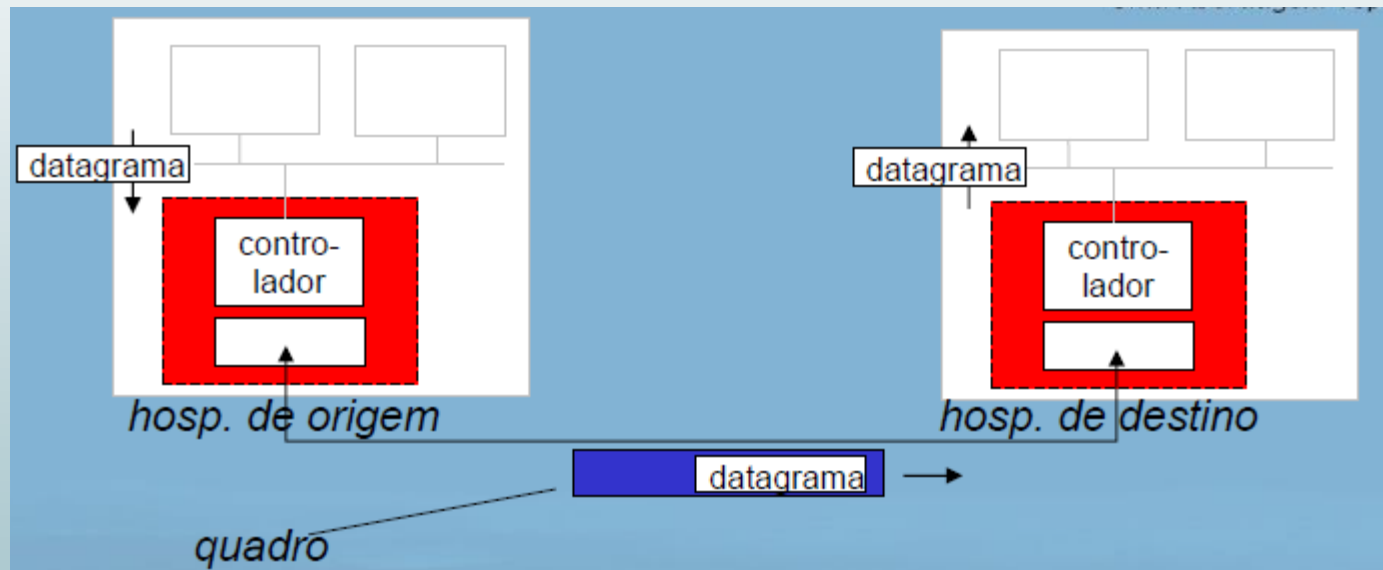
- Na maior parte, a camada de enlace é implementada em um **adaptador de rede**, às vezes também conhecido como **placa de interface de rede (NIC)**.
- No núcleo do adaptador de rede está o controlador da camada de enlace que executa vários serviços da camada de enlace.
- Dessa forma, muito da funcionalidade do controlador da camada de enlace é realizado em hardware.

Onde a camada de enlace é implementada?

- A figura a seguir mostra a arquitetura típica de um hospedeiro



Comunicação entre adaptadores

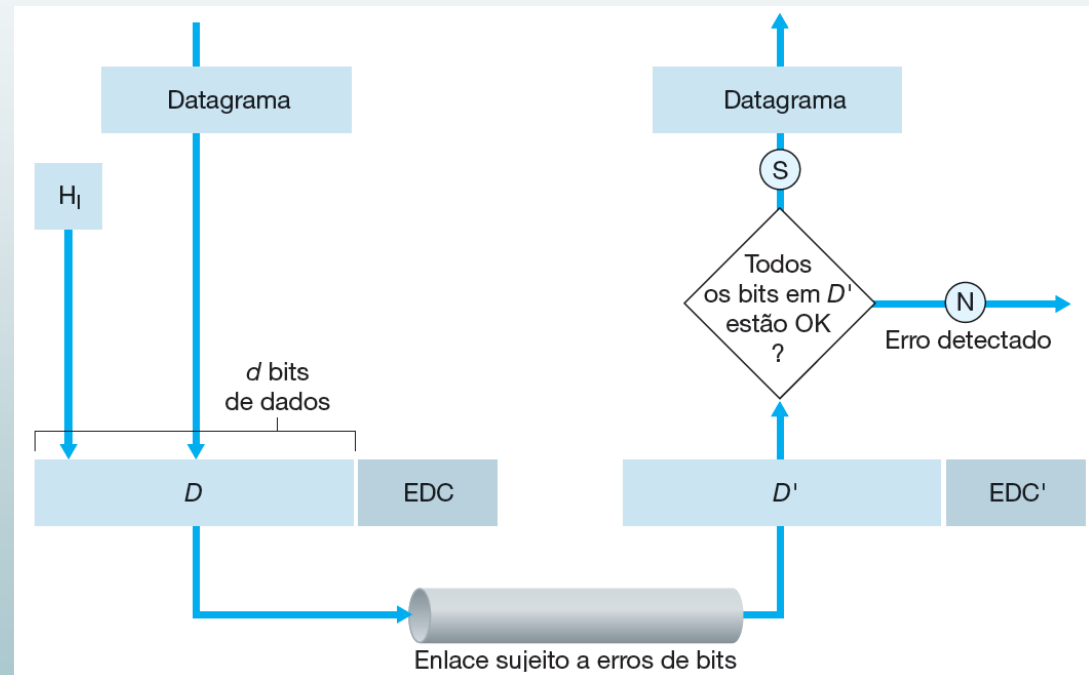


Técnicas de detecção e correção de erros

EDC = Bits de detecção e correção de erros (redundância)

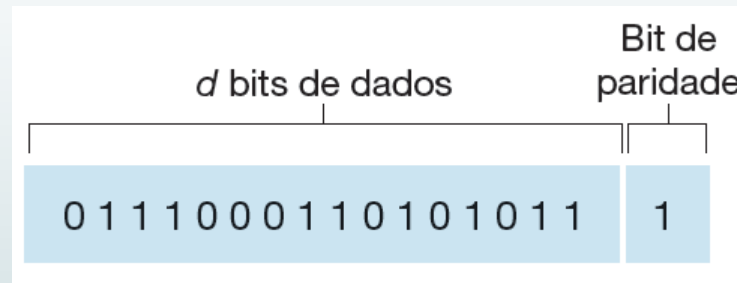
D = Dados protegidos por verificação de erro, podem incluir campos de cabeçalho

Detecção de erro não 100% confiável!

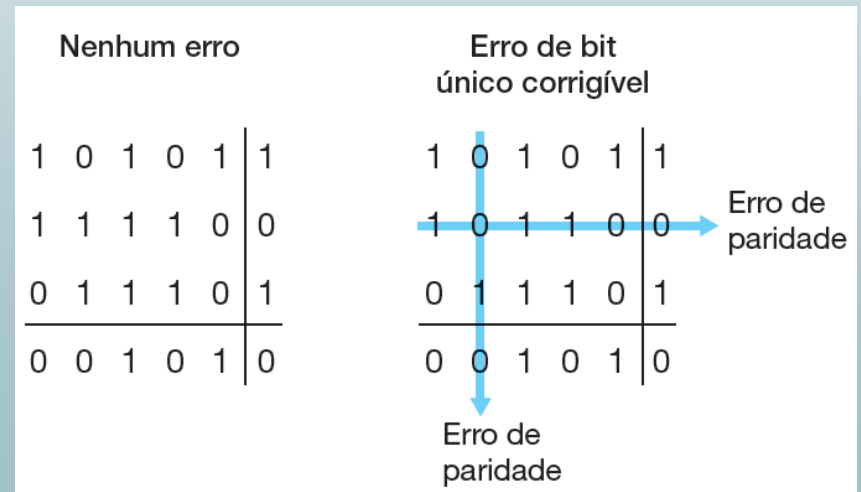
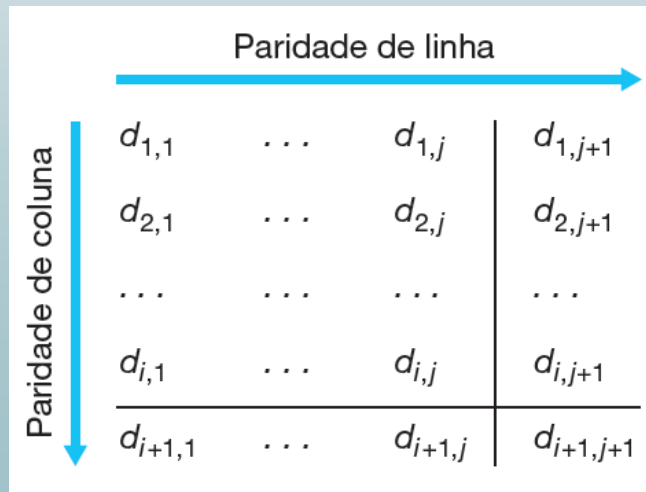


Paridade e Paridade Bidimensional

Paridade



Paridade
Bidimensional



Soma de verificação (Checksum)

[RFC1071]

Objetivo: detectar "erros" (p. e., bits invertidos) no pacote transmitido (nota: usada *somente* na camada de transporte)

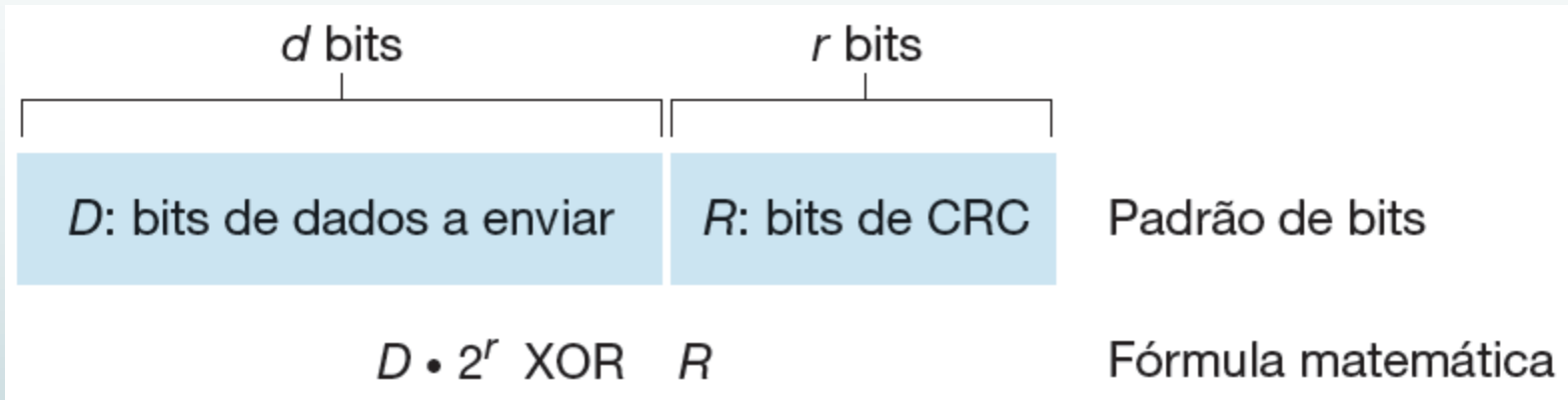
Emissor:

- trata conteúdo do segmento como sequência de inteiros de 16 bits
- soma de verificação: adição das sequências do conteúdo do segmento
- emissor faz o complemento de 1 no resultado da soma

Receptor:

- calcula soma de verificação do segmento recebido, incluindo o checksum
- verifica se o resultado possui todos os bits setados (1):
 - NÃO – erro detectado
 - SIM – nenhum erro detectado.

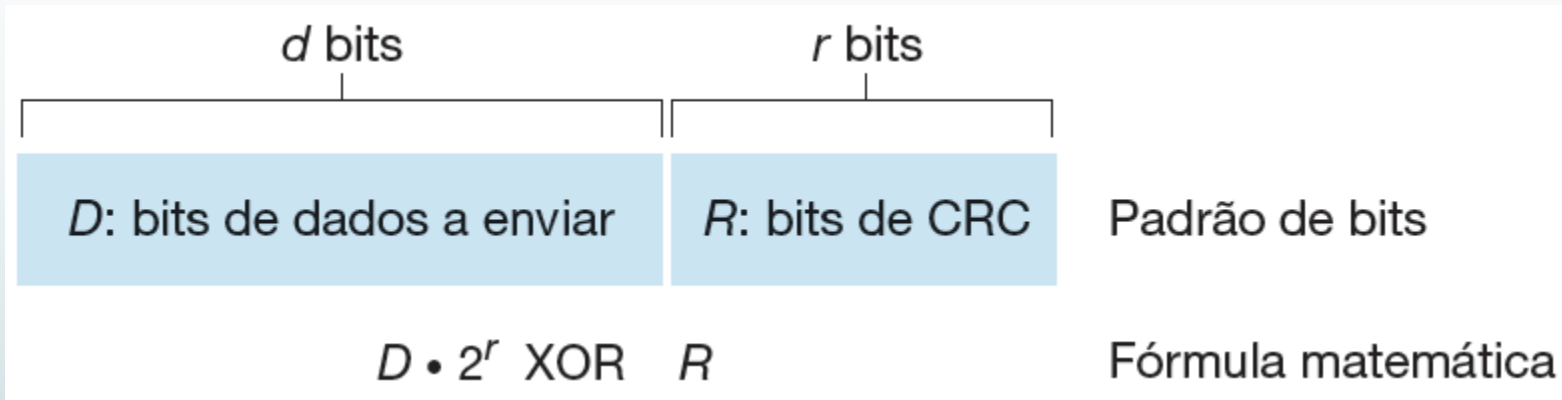
Verificação de redundância cíclica (CRC)



Padrões IEEE: $r = 8, 16, 32$

Detecta rajadas de até $r-1$ bits com erro.

Verificação de redundância cíclica (CRC)



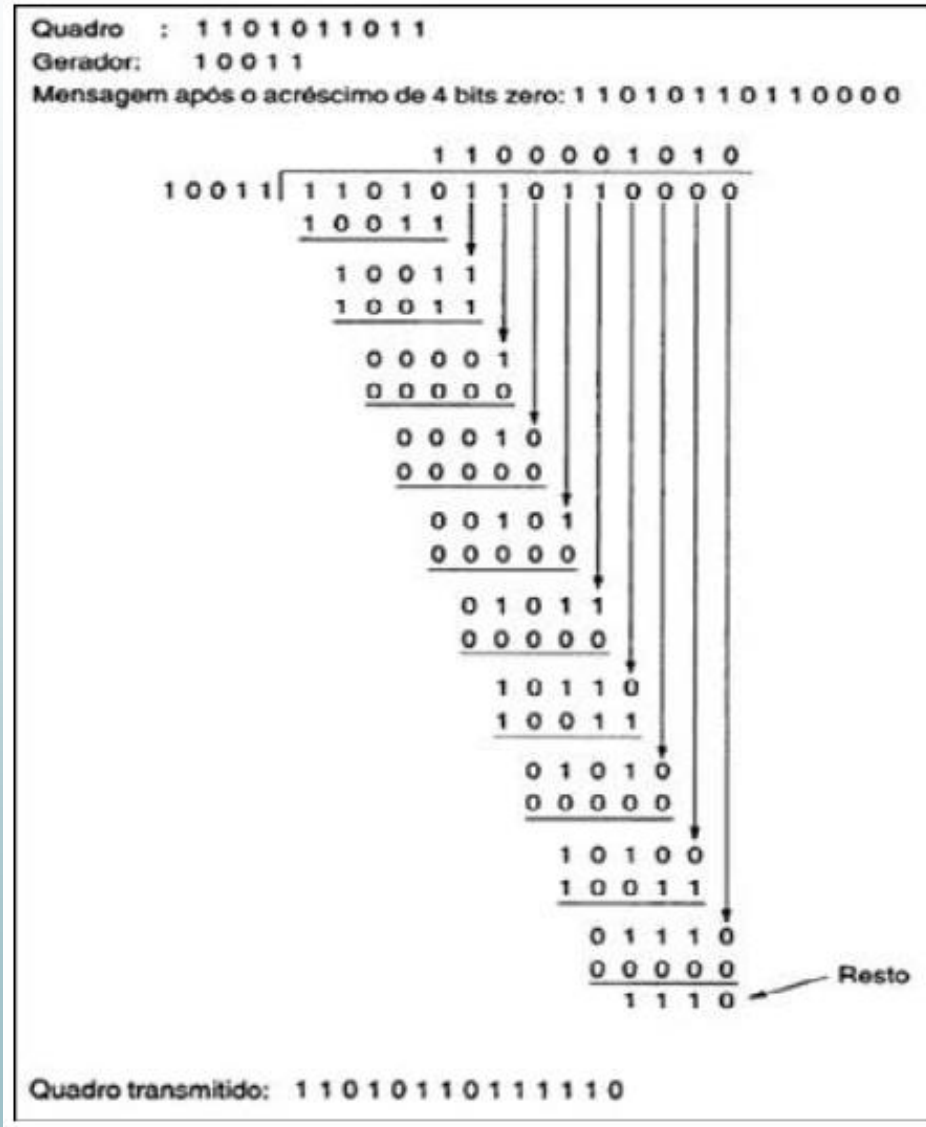
Aritmética e divisão módulo 2

- Não tem “vai um” ou “empresta um” nas operações
- XOR

Ex. $M(x) = x^4 + x^2 + 1$ e $D(x) = x^4 + x^3$

$$M(x) / D(x) = M(x) \text{ XOR } D(x) = 10101 \text{ XOR } 11000 = 01101$$

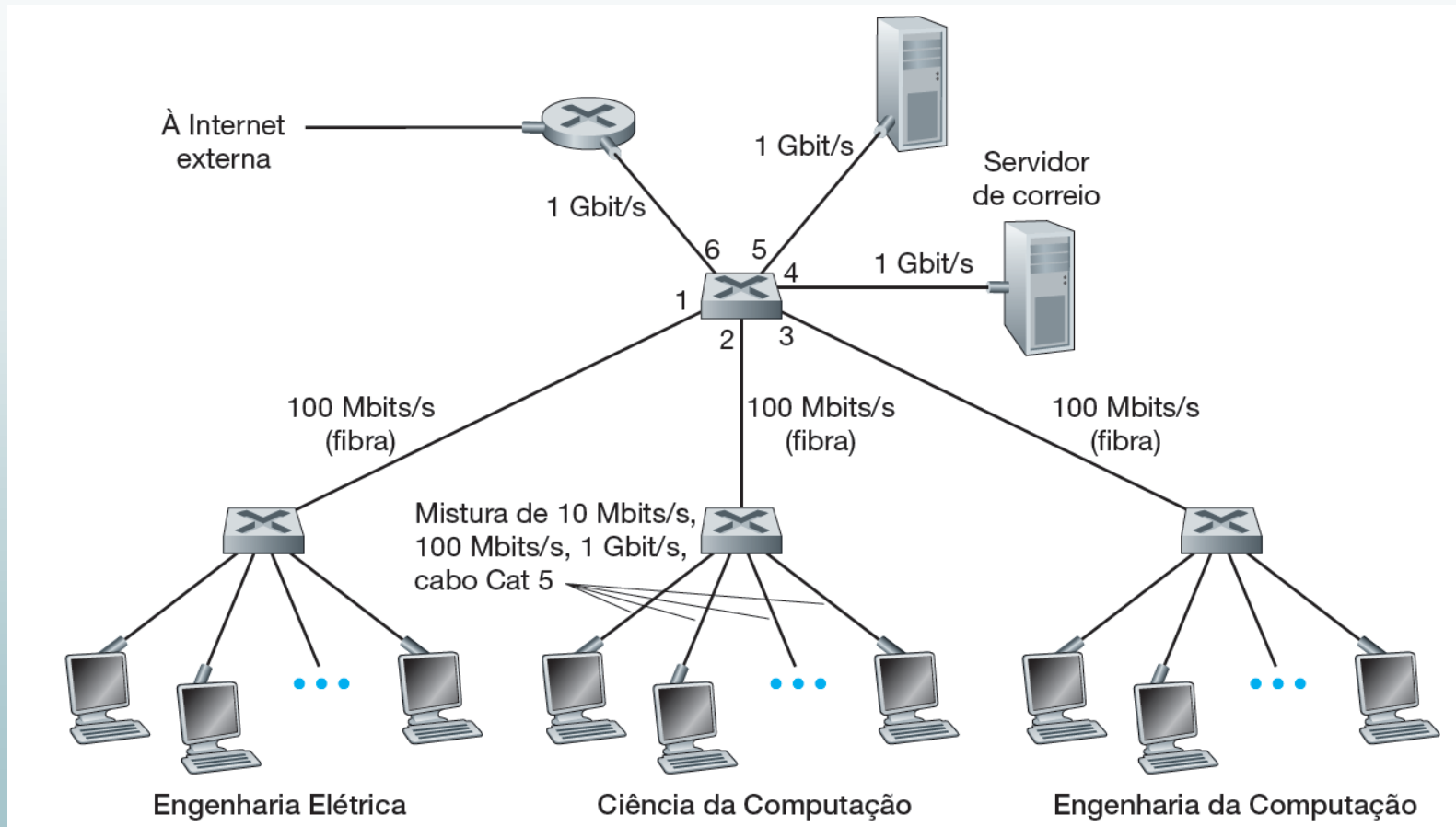
Exemplo



$$D = 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1$$

$$R = G = x^4 + x^1 + 1$$

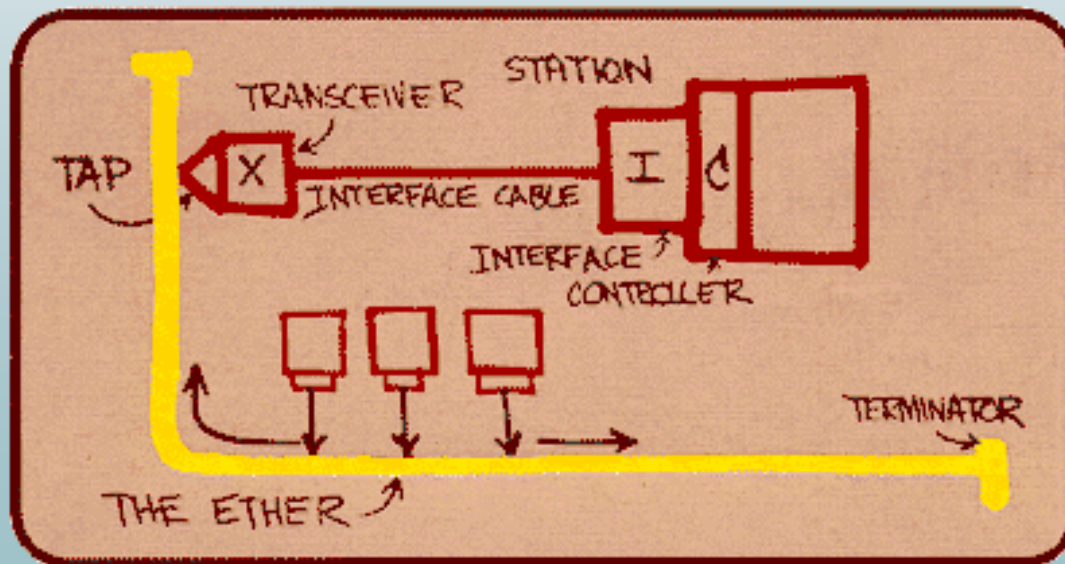
■ Redes Locais Computadas



■ Redes Ethernet

Tecnologia de LAN com fio dominante:

- Baixo custo: ~ US\$ 10 para NIC
- Primeira tecnologia de LAN utilizada em larga escala
- Mais simples e mais barata que as LANs de permissão e ATM
- Acompanhou corrida da velocidade: 10 Mbps – 10 Gbps



Projeto original da Ethernet

▪ Redes Ethernet

Topologia de barramento popular até meados dos anos 90

- Todos os nós no mesmo domínio de colisão (podem colidir uns com os outros)

Atualmente: topologia de estrela prevalece

- *Comutador* ativo no centro (comumente um switch)
- Cada “ponta” roda um protocolo Ethernet (separado)
- Nós não colidem uns com os outros



■ Redes Ethernet

As redes Ethernet possuem topologia lógica de múltiplo acesso, e utilizam o método chamado CSMA-CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*)

Padrão IEEE 802.3

Objetivo: evitar longos períodos de colisões:

1. A estação colisão absoluta em início de tempo se transmite e detecta a colisão imediatamente e interrompe a transmissão, 2. Se o meio estiver livre, transmite. Durante este período o meio fica inutilizado. Se houve colisão e espera um tempo aleatório para voltar a transmitir. 3. Se estiver ocupado, continua a ouvir até ficar livre e então transmite

■ CSMA-CD

Depois de abortar, a estação entra em **backoff exponencial**:

- Após m colisões, a estação atribui a uma variável K um valor aleatório entre: $\{0,1,2,\dots,2^{m-1}\}$.

Na sequência espera $K \cdot (512)$ tempos de bit, e retorna à etapa de escutar o meio para transmitir

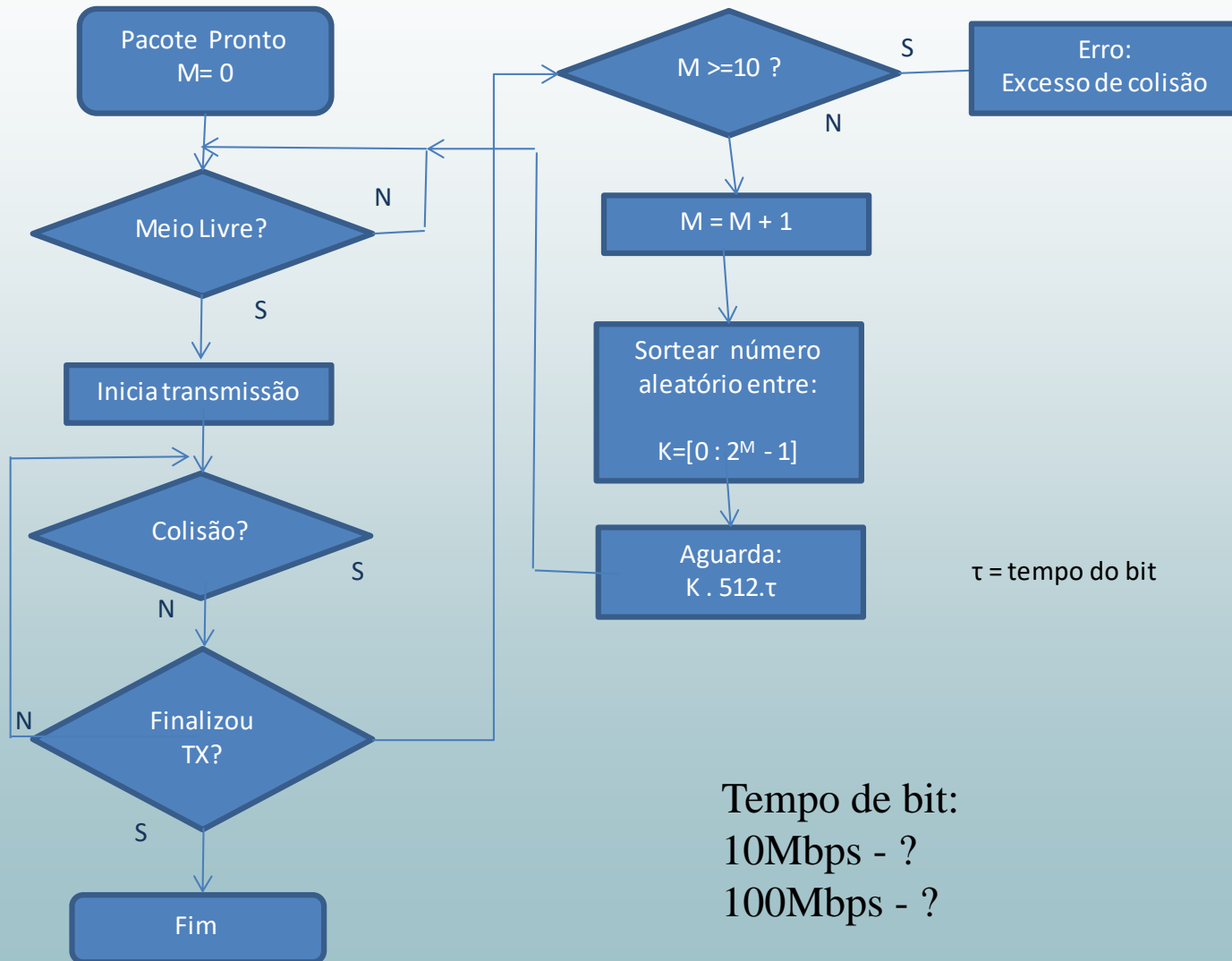
Sinal de congestionamento: cuida para que todos os outros transmissores saibam da colisão; 48 bits

Tempo de bit: 0,1 μ s para Ethernet de 10 Mbps;
para $K = 1023$, tempo de espera cerca de 50 ms

Backoff exponencial: adapta tentativas de retransmissão à carga estimada

- primeira colisão: escolha K a partir de $\{0,1\}$; atraso é $K \cdot 512$ tempos de transmissão de bit
- após segunda colisão: escolha K dentre $\{0,1,2,3\}$...
- após dez colisões, escolha K dentre $\{0,1,2,3,4,\dots,1023\}$

■ CSMA-CD



■ Redes Ethernet

Adaptador de origem encapsula datagrama IP (ou outro pacote de protocolo da camada de rede) no **quadro Ethernet**.



Preâmbulo:

- 7 bytes com padrão 10101010 seguido por um byte com padrão 10101011
- Utilizado para sincronização do clock do receptor e emissor

■ Redes Ethernet



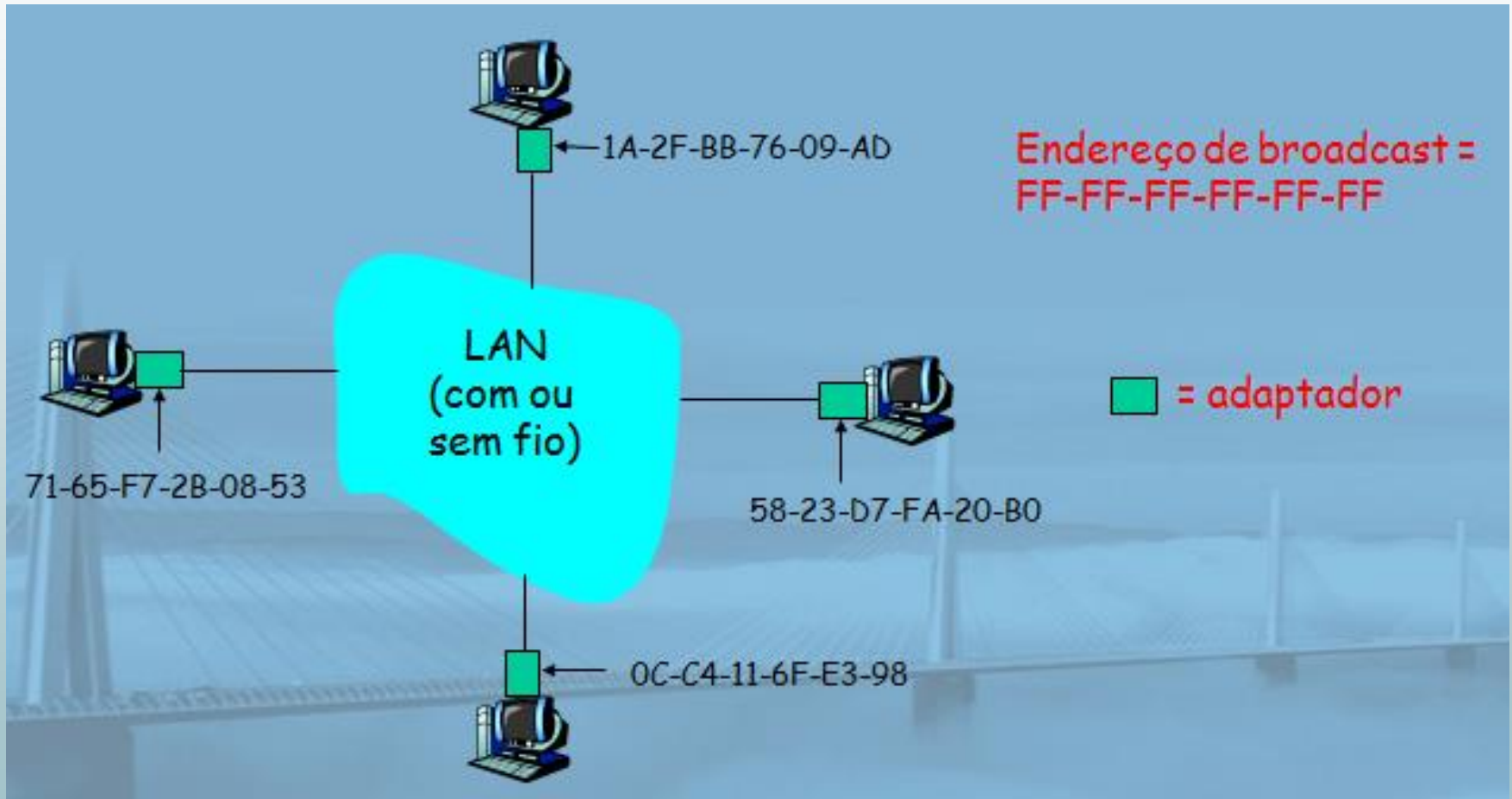
- **Endereços:** 6 bytes
 - se adaptador recebe quadro com endereço de destino que seja o seu próprio MAC, ou com endereço de broadcast (p. e., pacote ARP), passa dados do quadro ao protocolo da camada de rede
 - caso contrário, adaptador descarta quadro
- **Tipo:** indica protocolo da camada mais alta (principalmente IP, mas outros são possíveis, p. e., Novell IPX, AppleTalk)
- **CRC:** verificado no receptor; se detectar erro, quadro é descartado

▪ Redes Ethernet e Tecnologia de Switching

- Endereço IP de 32 bits:
 - Endereço da *camada de rede*
 - Utilizado para obter datagrama até sub-rede IP de destino
- Endereço MAC (*Media Access Control Address*) :
 - Função: *levar quadro de uma interface para outra interface conectada fisicamente (na mesma rede)*
 - Endereço MAC de 48 bits
 - Queimado na ROM da NIC

▪ Endereços MAC

Cada adaptador na LAN tem endereço de LAN exclusivo



■ Endereço MAC

Os dispositivos de uma rede são identificados por endereço físico único gravados pelos fabricantes nas suas placas de rede (NICs).

O IEEE é o órgão responsável pela alocação do endereço MAC, onde o fabricante compra parte do espaço de endereços MAC (para garantir exclusividade)

OUI (*Organizational Unique Identifier*) são os 24 bits mais significativos e identificam o fabricante de forma universal.

Os 24 bits menos significativos são administrados localmente pelo fabricante e identificam o número de série da placa deste fabricante.

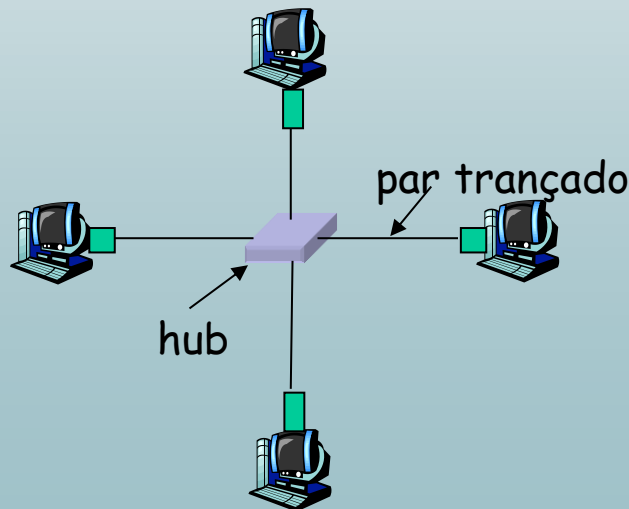
*** Portabilidade: o endereço MAC é plano, possibilitando que uma estação seja movida de uma LAN para outra sem configurações adicionais.

▪ Tecnologias de Comutação

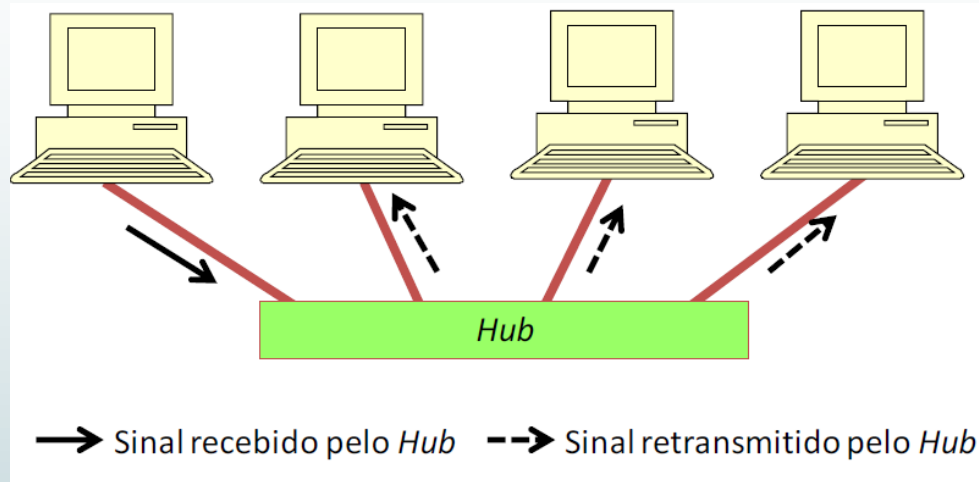
Hub

Repetidores da camada física (sem “inteligência”):

- Todos os nós conectados ao hub podem colidir uns com os outros
- Sem *buffering* de quadros
- Bits chegando a um enlace saem em *todos* os outros enlaces na mesma velocidade



■ Tecnologias de Comutação



▪ Tecnologias de Comutação

Bridge e Switch

Dispositivos de camada de enlace: mais inteligente que os hubs, têm papel *ativo*:

- Armazenam e repassam quadros Ethernet
- Examinam endereço MAC do quadro que chega, repassam seletivamente o quadro para um ou mais enlaces de saída

Transparente:

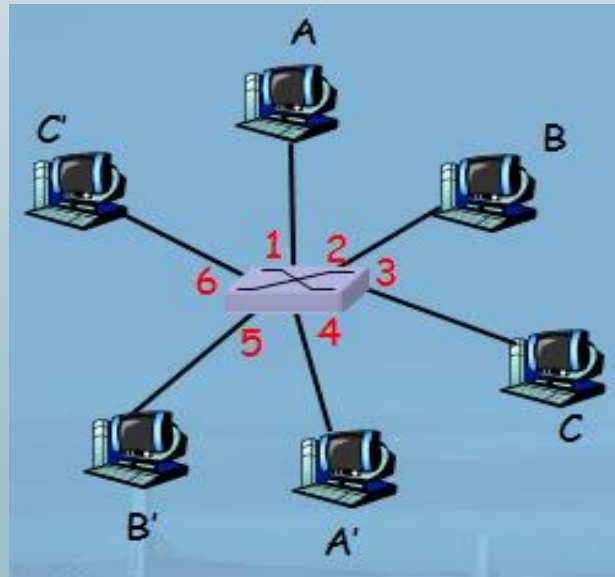
- Estações não sabem da presença de comutadores

Plug-and-play, autodidata:

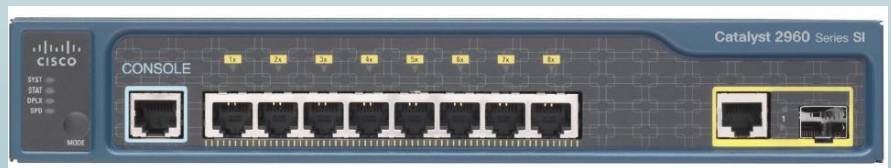
- Comutadores não precisam ser configurados

▪ Switch

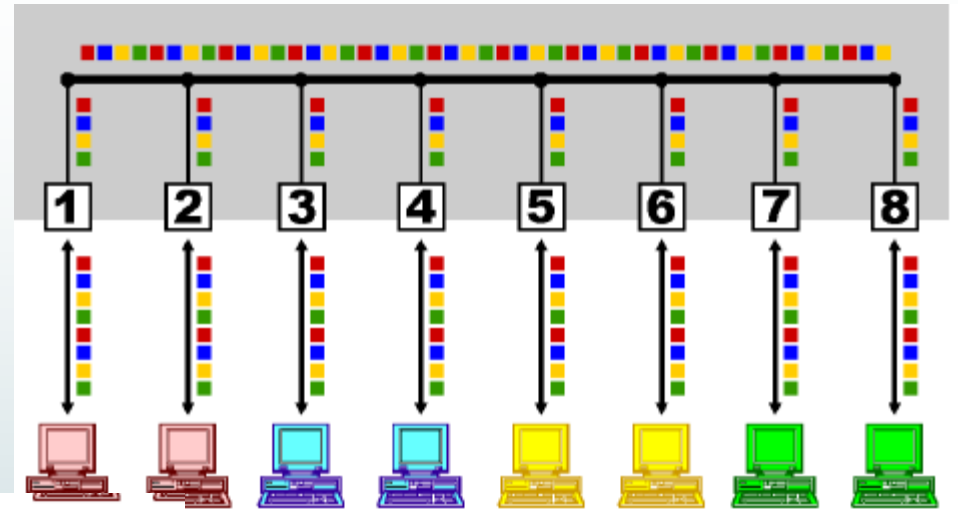
- Permitem múltiplas transmissões simultâneas
- Estações têm conexão dedicada, direta com comutador
- Switches mantêm os pacotes
- Protocolo Ethernet usado em *cada* enlace de chegada, mas sem colisões
 - Cada enlace é seu próprio domínio de colisão
- *Comutação:* A-para-A' e B-para-B' simultânea, sem colisões



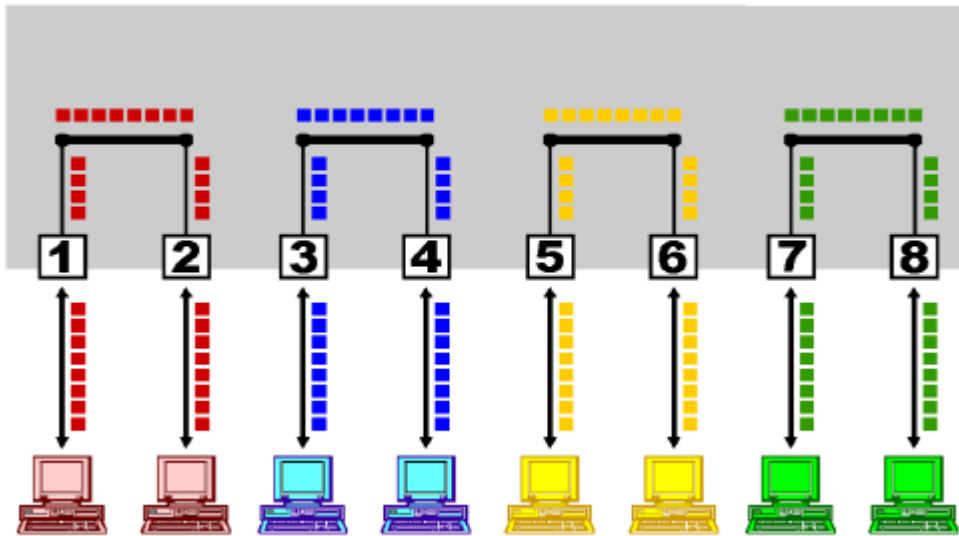
■ Switch



■ Hub x Switch



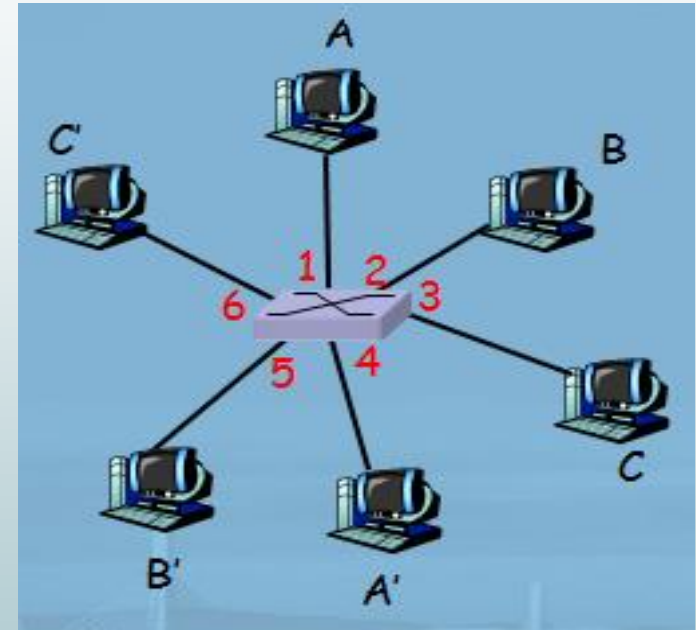
Switch



HUB

▪ Switch

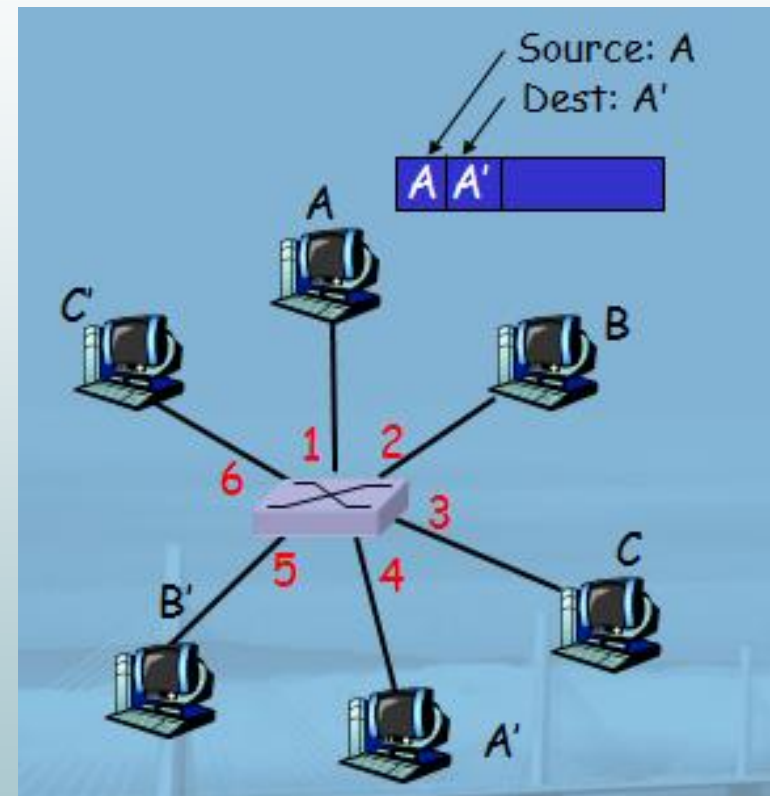
- Tabela de comutação (Tabela MAC):
- Como o switch sabe que A' se encontra na interface 4, B' se encontra na interface 5?
- Cada switch possui uma **tabela MAC**:
 - Endereço MAC do nó X interface para alcançar nó)
- Como as entradas são criadas, mantidas na tabela comutação?



▪ Switch

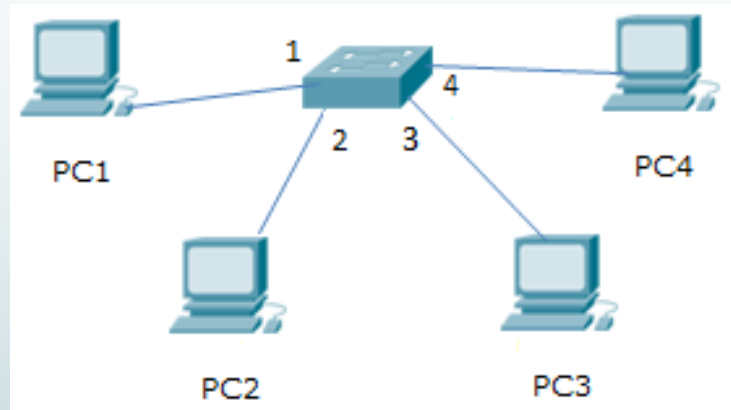
- O switch *descobre* quais nós podem ser alcançados por quais interfaces:
 - Quando quadro recebido, ele “aprende” local do emissor: segmento de LAN de chegada
 - Registra par emissor/local na tabela de comutação

end. MAC	interface
<i>A</i>	<i>1</i>



▪ Estudo de Caso

Dada a rede a seguir, supondo a tabela MAC limpa.

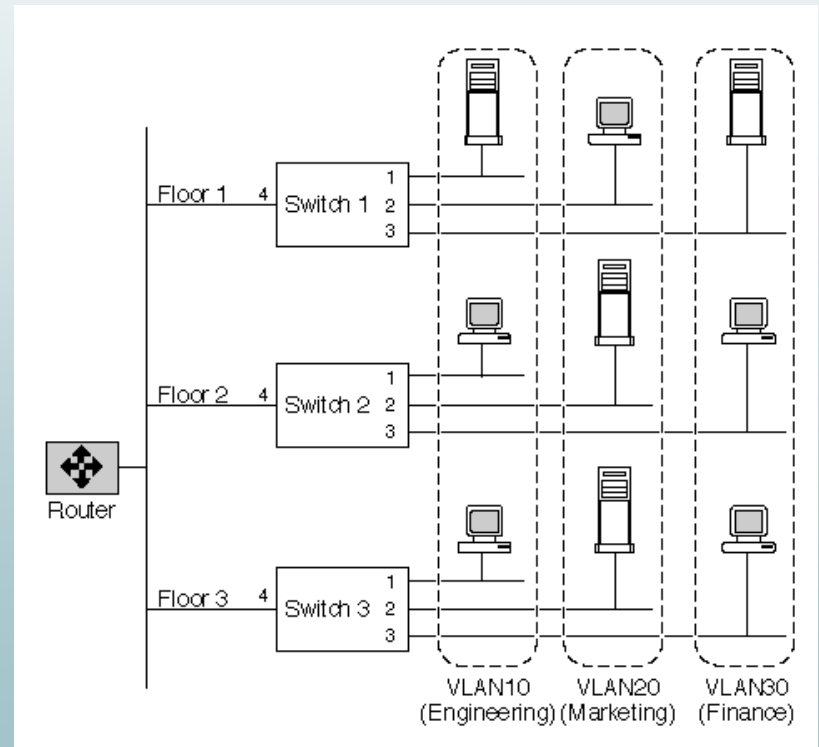


- Se o PC1 envia um ping para o PC2, o que o switch fará com o frame que recebe na sua porta 1?
- Esboce como ficará a tabela MAC do switch.
- Em seguida, o PC4 envia um ping para o PC1, o que o switch fará com o frame que recebe na sua porta 4?
- Esboce como ficará a tabela MAC do switch.

▪ Redes locais virtuais (VLANs)

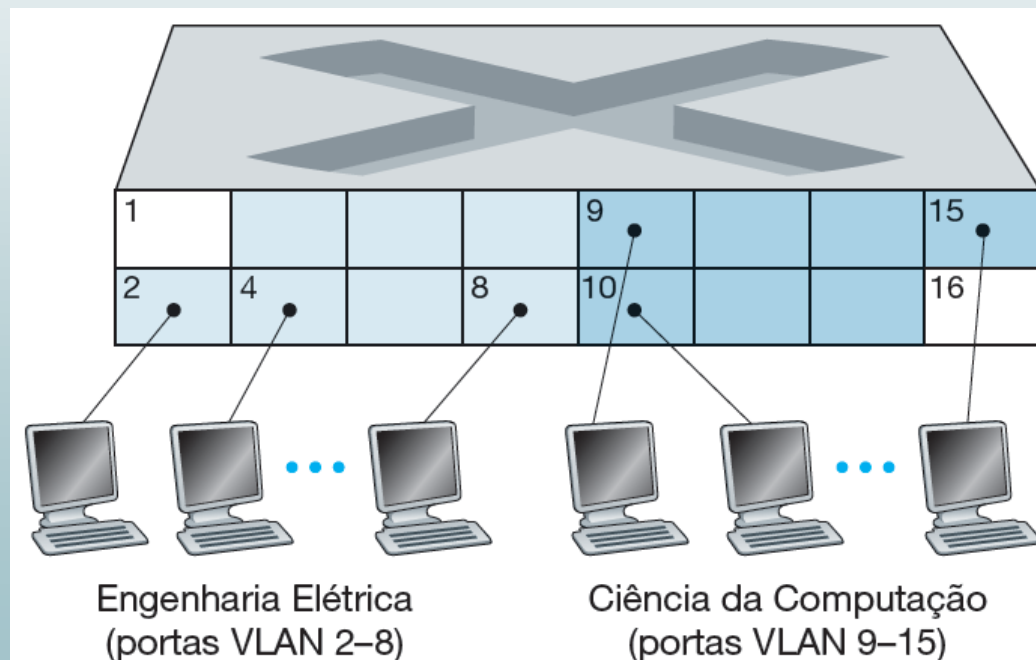
VLANs permitem o agrupamento lógico de estações finais que estão fisicamente dispersas em uma rede.

- ✓ Facilidade de administração
- ✓ Confinamento de domínios de broadcast
- ✓ Tráfego de broadcast reduzido
- ✓ Aplicação de políticas de segurança



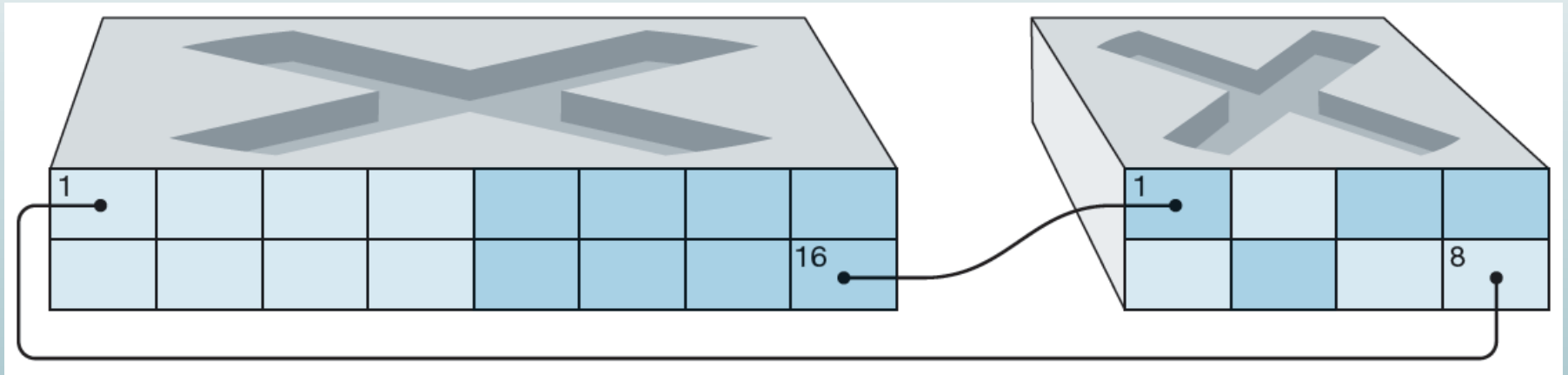
▪ Redes locais virtuais (VLANs)

Um comutador que suporta VLANs permite que diversas redes locais virtuais sejam executadas por meio de uma única infraestrutura física de uma rede local virtual



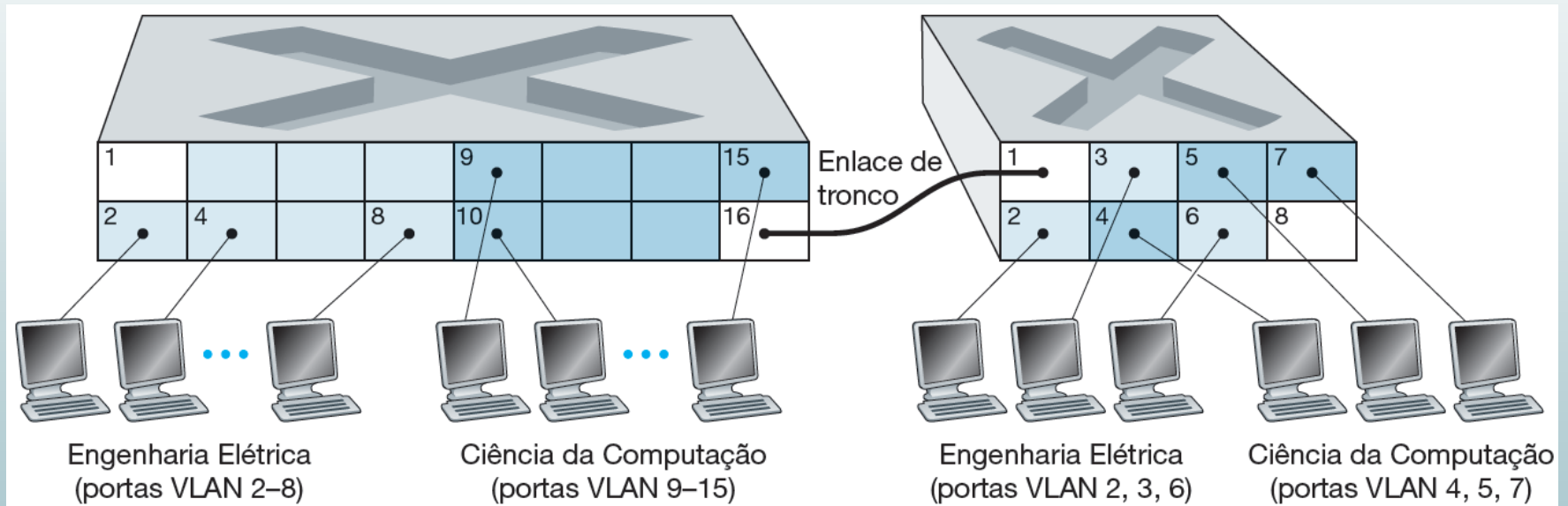
▪ Redes locais virtuais (VLANs)

- Conectando 2 comutadores da VLAN a duas VLANs: 2 cabos



▪ Redes locais virtuais (VLANs)

- Conectando 2 comutadores da VLAN a duas VLANs: entroncados

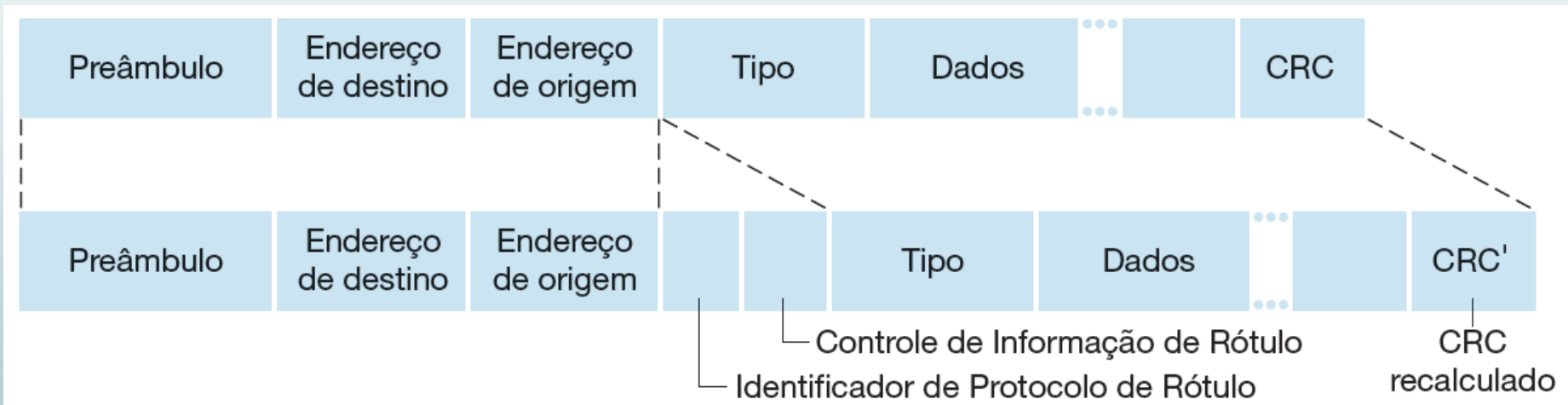


Usuários: **Porta Access**

Portas para conexão de VLANs em Switches diferentes: **Porta Trunk**

▪ Redes locais virtuais (VLANs)

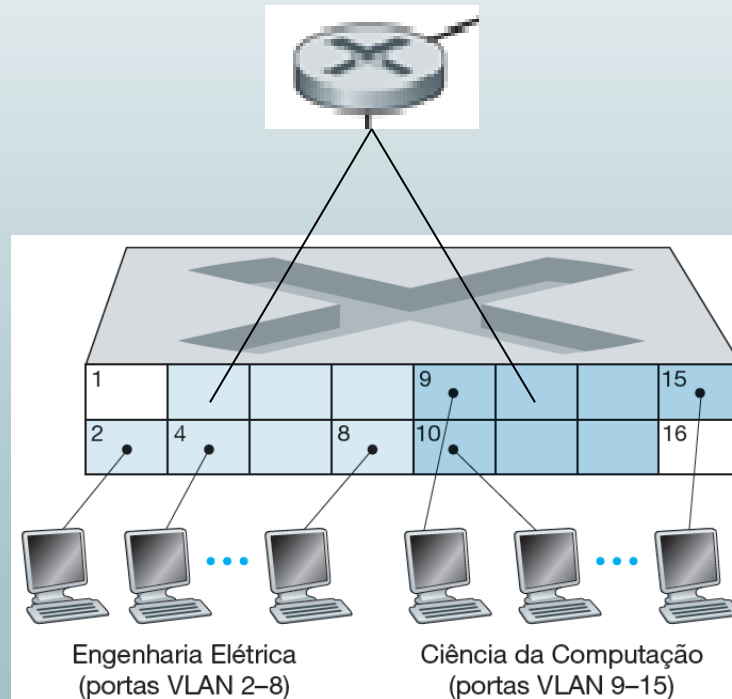
- Quadro Ethernet original (no alto); quadro VLAN Ethernet 802.1Q-tagged (embaixo)



■ Comunicação entre VLANs distintas

Deve ser implementado processo de roteamento

- Através de um roteador conectado entre as vlans
- Utilizando Switch L3 (nível 3) que possui capacidade de roteamento

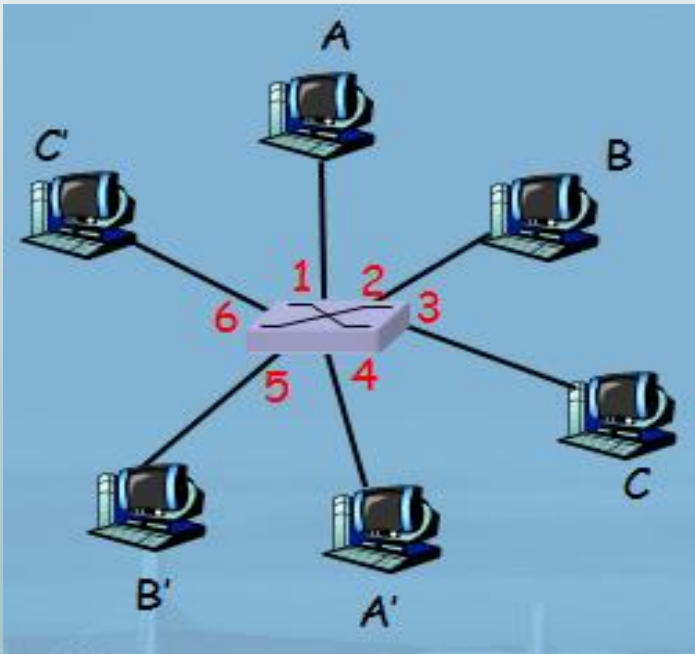


▪ ARP: Address Resolution Protocol

RFC 826

Os serviços e aplicações se comunicam por meio dos endereços IP

Suponha que o equipamento A deseja se comunicar com o B.



Camada 3

Camada 2

IP ORIGEM	IP DESTINO
MAC ORIGEM	MAC DESTINO

Camada 3

Camada 2

IP A	IP B
MAC A	MAC B

A conhece o IP de B, mas ...

A conhece o MAC de B ?

Como A poderia obter o MAC de B ?

▪ ARP: Address Resolution Protocol

Pergunta: Como determinar endereço MAC de B sabendo o endereço IP de B?

Através do **Protocolo ARP**

Cada nó IP (hosp., roteador) na LAN tem tabela ARP

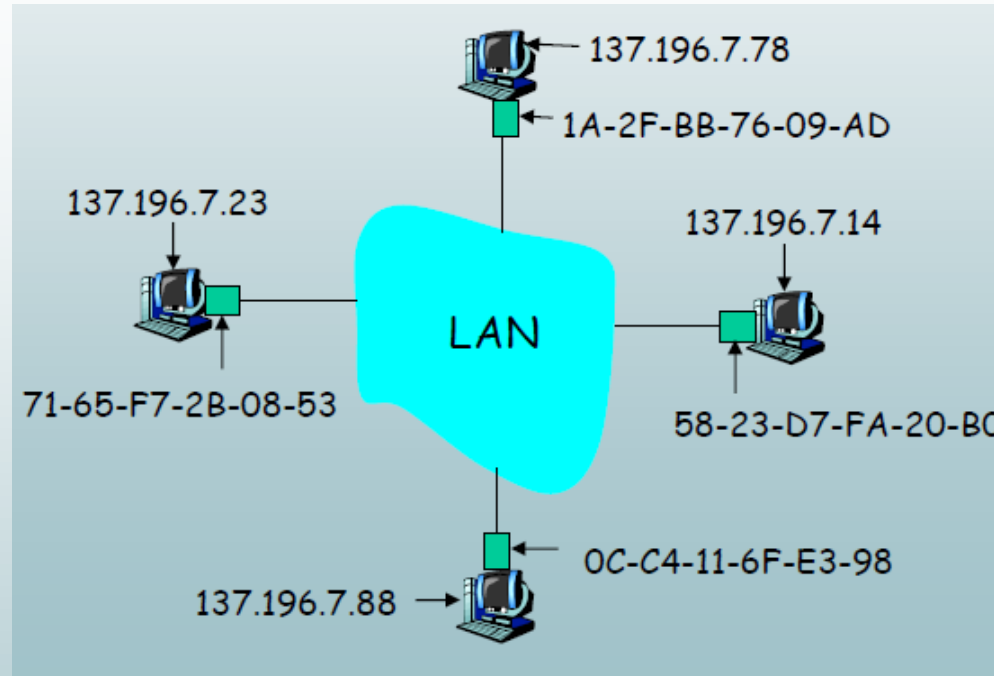
- Tabela ARP: mapeamentos de endereço IP/MAC para nós da LAN <endereço IP; endereço MAC; TTL>

- TTL (Time To Live): tempo após o qual o mapeamento de endereço será esquecido (normalmente, 20 min)

▪ ARP: Address Resolution Protocol (mesma LAN)

- A quer enviar datagrama a B, e endereço MAC de B não está na tabela ARP de A.
- A envia por **broadcast** pacote de consulta ARP, contendo endereço IP de B
 - endereço MAC de destino = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - todas as máquinas na LAN recebem consulta ARP
- B recebe pacote ARP, responde para A com seu endereço MAC (de B)
 - quadro enviado ao endereço MAC de A (unicast)
- A salva em cache par de endereços IP-para-MAC em sua tabela ARP até a informação expirar
 - estado soft: informação que expira (desaparece) se não for renovada
- ARP é “plug-and-play”:
 - nós criam suas tabelas ARP *sem intervenção do administrador de rede*

■ ARP: Address Resolution Protocol

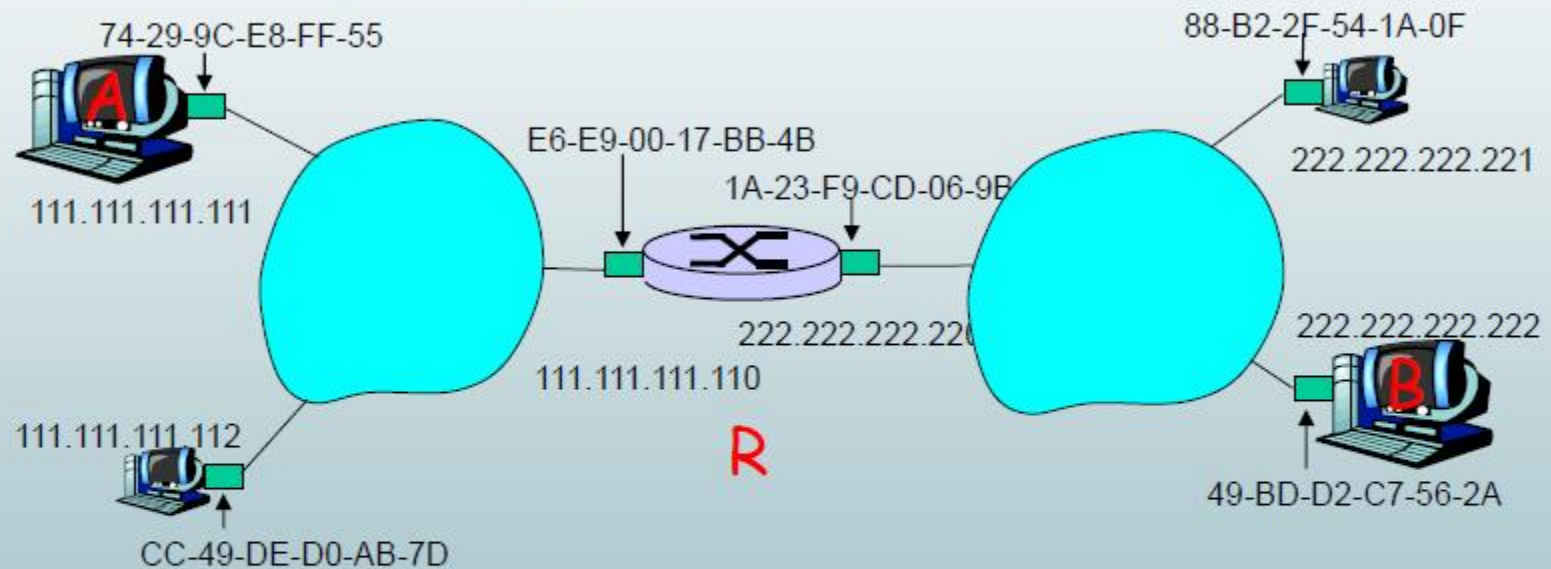


Camada 3	IP ORIGEM	IP DESTINO	
Camada 2	MAC ORIGEM	MAC DESTINO	
Camada 3	137.196.7.78	137.196.7.14	ARP QUERY "Who has 137.196.7.14"
Camada 2	1A-2F-BB-76-09-AD	FF-FF-FF-FF-FF-FF	
Camada 3	137.196.7.14	137.196.7.78	ARP REPLY "137.196.7.14 is at 58-23-D7-FA-20-B0"
Camada 2	58-23-D7-FA-20-B0	1A-2F-BB-76-09-AD	

▪ ARP: Address Resolution Protocol (outra LAN)

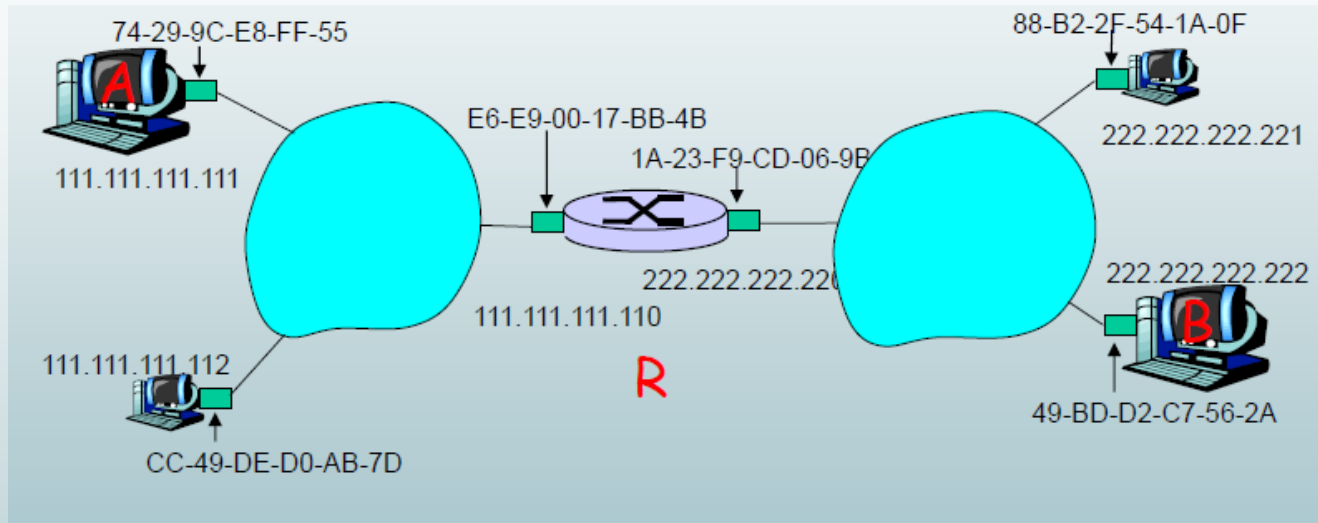
acompanhamento: **enviar datagrama de A para B via R**

suponha que A saiba o endereço IP de B



- duas tabelas ARP no roteador R, uma para cada rede IP (LAN)

■ ARP: Address Resolution Protocol (outra LAN)



Camada 3	IP ORIGEM	IP DESTINO
Camada 2	MAC ORIGEM	MAC DESTINO

Camada 3	111.111.111.111	111.111.111.110	ARP QUERY
Camada 2	74-29-9C-E8-FF-55	FF-FF-FF-FF-FF-FF	"Who has 111.111.111.110"

Camada 3	111.111.111.110	111.111.111.111	ARP REPLY
Camada 2	E6-E9-00-17-BB-4B	74-29-9C-E8-FF-55	"111.111.111.110 is at E6-E9-00-17-BB-4B"

Camada 3	111.111.111.111	222.222.222.222	PING (ICMP ECHO REQUEST)
Camada 2	74-29-9C-E8-FF-55	E6-E9-00-17-BB-4B	"111.111.111.110 is at E6-E9-00-17-BB-4B"

PERGUNTAS ?

