

Cap. 05 – Camada de Enlace Lógico

5.1 – Introdução e Serviços

5.2 – Técnicas de Detecção e Correção de Erros

5.2.1 – Verificação por Paridade

5.2.2 – Método de Soma Verificação

5.2.3 – Verificação de Redundância Cíclica (CRC)

5.3 – Enlaces e Protocolos de Acesso Múltiplo

5.3.1 – Protocolos de Divisão de Canal

5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

5.3.3 – Protocolos de Revezamento

... Cap. 05 – Camada de Enlace Lógico

5.4 – Endereçamento da Camada de Enlace

5.4.1 - Endereço MAC

5.4.2 - Address Resolution Protocol – ARP

5.5 – IEEE 802.3 ou Ethernet

5.5.1 - Estrutura do Quadro Ethernet

5.5.2 – Protocolo de Acesso Múltiplo CSMA/CD

5.5.3 – Tecnologias Ethernet

5.6 – Comutadores da Camada de Enlace

5.6.1 –

... Cap. 05 – Camada de Enlace Lógico

5.6 – Comutadores da Camada de Enlace

5.6.1 – Repasse e Filtragem

5.6.2 - Aprendizagem Automática

5.6.3 – Propriedades do Switch

5.6.4 – Switch vs Roteador

5.7 – Protocolo P2P

5.7.1 – P2P: Quadro de Dados

5.7.2 – P2P: Byte Stuffing

5.8 – Virtualização de Enlace – MPLS

5.8.1 – Comutação de Rótulos MPLS

Referências Bibliográficas

- James F. Kurose; Keith W. Ross – Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down – Pearson São Paulo; 6th; 2014; ISBN: 978-85-430-1443-2
- ... Lectures dos autores James F. Kurose; Keith W. Ross
“https://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/eighth.htm”
- Notas de Aula do Prof. Maurício Magalhães e Eleri Cardozo da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP “www.dca.feec.unicamp.br/~mauricio/~elerij”.

5 - Camada de Enlace Lógico

Objetivos e Motivações

- **“princípios dos serviços”** .. da camada de enlace:
 - detecção e correção de erro.
 - endereçamento da camada de enlace.
 - canal de “broadcast” e canal ponto-a-ponto.
 - transferência de dados confiável bem como controle de fluxo.
-
- Instanciação de várias tecnologias (camada de enlace).
 - Implementação de várias tecnologias (camada de enlace).

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.1 - Introdução e Serviços

5.1 - Introdução e Serviços

- “hosts” e roteadores são tratados de nós, pois na camada de enlace não há diferença se a origem é um “host” ou roteador.
- “**enlaces**” .. canais de comunicação que conectam nós adjacentes, sejam eles enlaces cabeados, enlaces “wireless” ou LANs.
- “**frame**” .. unidade de dados trocada pelo protocolo de camada de enlace e que encapsula um pacote de camada de rede.
- “**protocolo da camada de enlace**” .. usado para transportar um quadro de dados de um nó ao nó adjacente por um enlace.
- Obs.: .. um datagrama pode ser transportado por diferentes protocolos de enlace nos diferentes enlaces ao longo de um caminho !

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.1 - Introdução e Serviços

... 5.1 - Introdução e Serviços

- “**serviço básico**” .. transporte de um datagrama de um nó até um nó adjacente por um único enlace de comunicação, podendo os serviços variarem de protocolo para protocolo.
- “**serviços normalmente oferecidos**” .. pela camada de enlace:
 - enquadramento de dados;
 - acesso ao enlace;
 - entrega confiável;
 - controle de fluxo;
 - detecção / correção de erros;
 - comunicação half-duplex ou full-duplex.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.1 - Introdução e Serviços

... 5.1 - Introdução e Serviços

- **“enquadramento e acesso ao enlace”** .. encapsula datagrama no quadro, incluindo “header” (cabeçalho) e “trailer” (rodapé).
- **“acesso ao canal”** (meio físico) de meio compartilhado .. são usados endereços “MAC” no cabeçalho do quadro para identificar a origem e destino, endereços estes diferentes dos endereços IP.
- **“entrega confiável”** .. raramente usado em enlace de baixa taxa de erros de bits, p.ex., fibra ótica, alguns pares trançados, etc.
- enlaces sem fio (altas taxas de erros) .. sugere o serviço confiável de entrega de dados em vez da retransmissão na camada de transp.
- ... por que confiabilidade em nível de enlace é fim a fim ?!

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.1 - Introdução e Serviços

... 5.1 - Introdução e Serviços

- **“controle de fluxo”** .. controle entre nós adjacentes para evitar que um lado do enlace congestionue o nó receptor do outro lado do enlace.
- **“detecção de erro”** .. necessidade de tratar os erros causados por ruídos e por atenuação de sinal ao longo do enlace.
- ... receptor detecta presença de erros e, assim, pode solicitar a re-transmissão, caso contrário deve descartar o quadro.
- ... embora seja contemplada nas camadas de transporte e de rede, detecção de erros na camada de enlace é geralmente mais sofisticada e implementada em “hardware” (rápidas e mais eficientes).

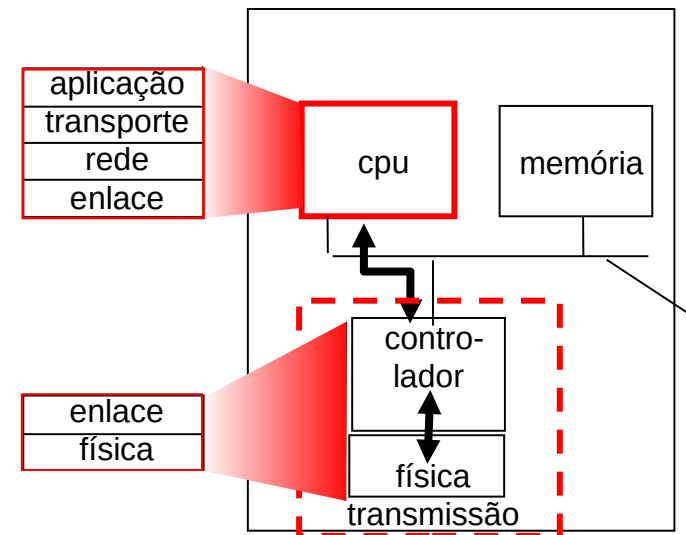
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.1 - Introdução e Serviços

... 5.1 - Introdução e Serviços

- “**correção de erro**” .. receptor não somente detecta erros, mas também corrige os erros de bits no quadro.
- ... receptor identifica e corrige erro(s) de bit(s) sem lançar mão da retransmissão, tornando o processo mais eficiente.
- “**half-duplex**” e “**full-duplex**” .. nós em ambos os lados podem transmitir ao mesmo tempo no modo “**full-duplex**”, pois cada lado contempla mecanismo de controle sobre o enlace.
- .. já no modo “**half-duplex**”, apenas um dos nós transmite ou recebe quadro, logo há a necessidade de mudança de controle para inversão do sentido de envio / recepção dos dados.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.1 - Introdução e Serviços ... 5.1 - Introdução e Serviços

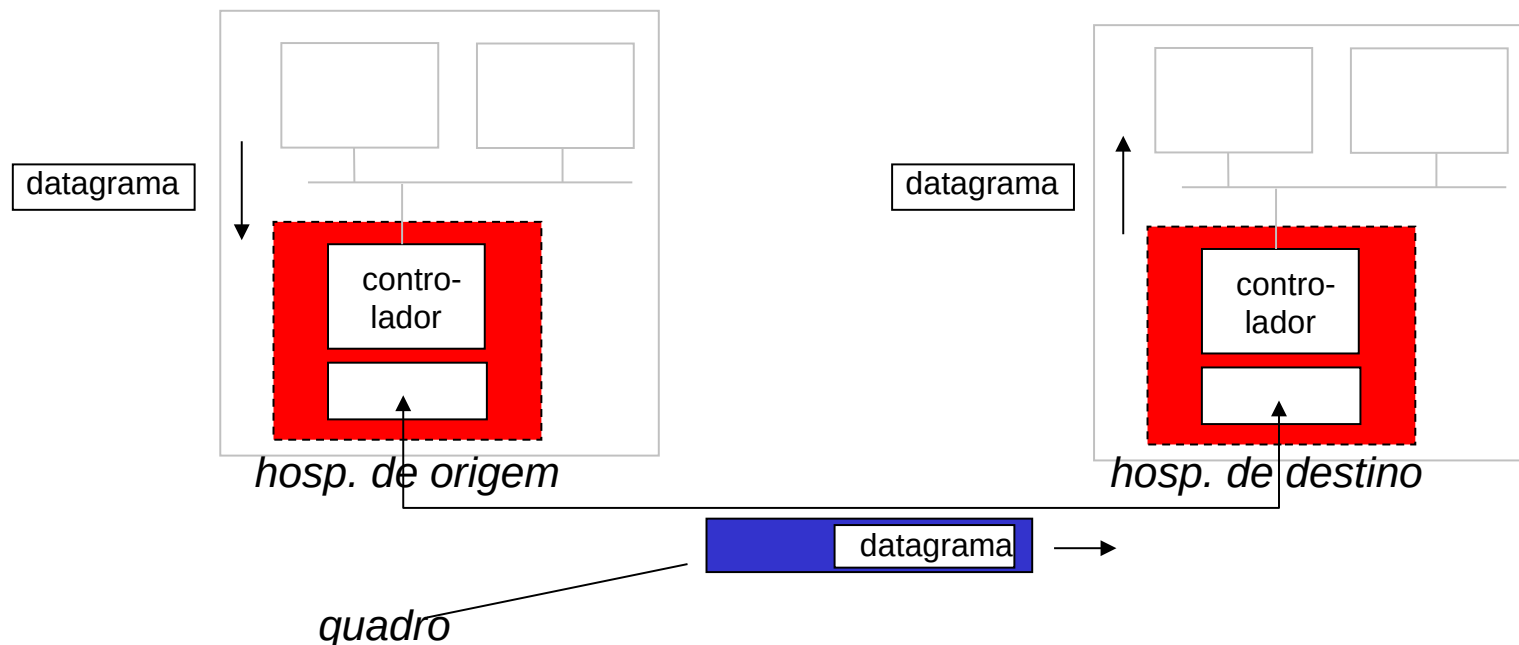
- “**camada de enlace**” .. implementada no adaptador ou na placa / interface de rede (NIC - “Network Interface Card”):
- Placa Ethernet ou Placa PCMCIA (PC Card) ou Placa 802.11 .. normalmente implementa as camadas de enlace e física.
- ... responsável pela conexão ao barramento de sistema do “host” e é uma combinação de “hardware”, “software” e “firmware”.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.1 - Introdução e Serviços

... 5.1 - Introdução e Serviços

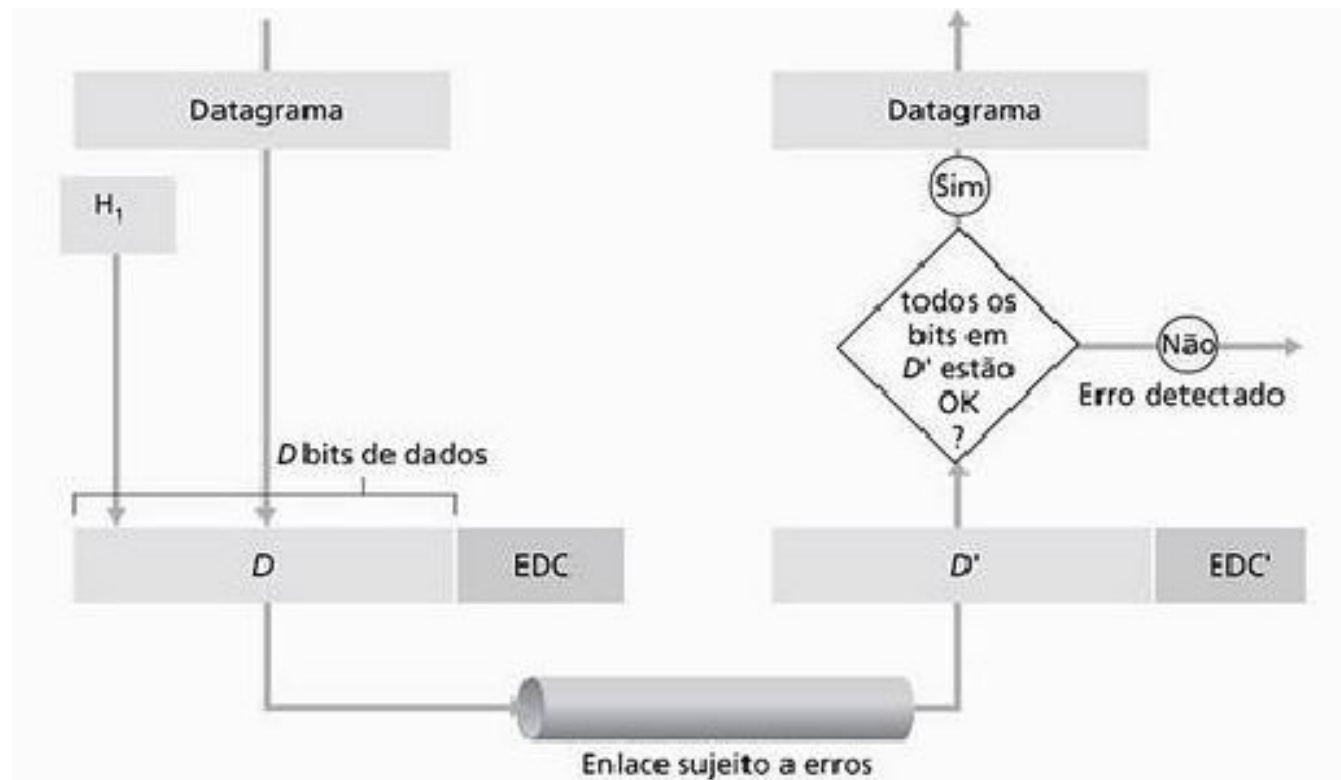
- “**lado emissor**” .. encapsula datagrama no quadro, ou seja, inclui os bits de verificação de erro, transf. confiável, controle de fluxo, etc.
- “**lado receptor**” .. extrai datagrama e passa à camada superior, ou seja, detecção de erros, transf. confiável, controle de fluxo, etc.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

5.2 – Detecção e Correção de Erros

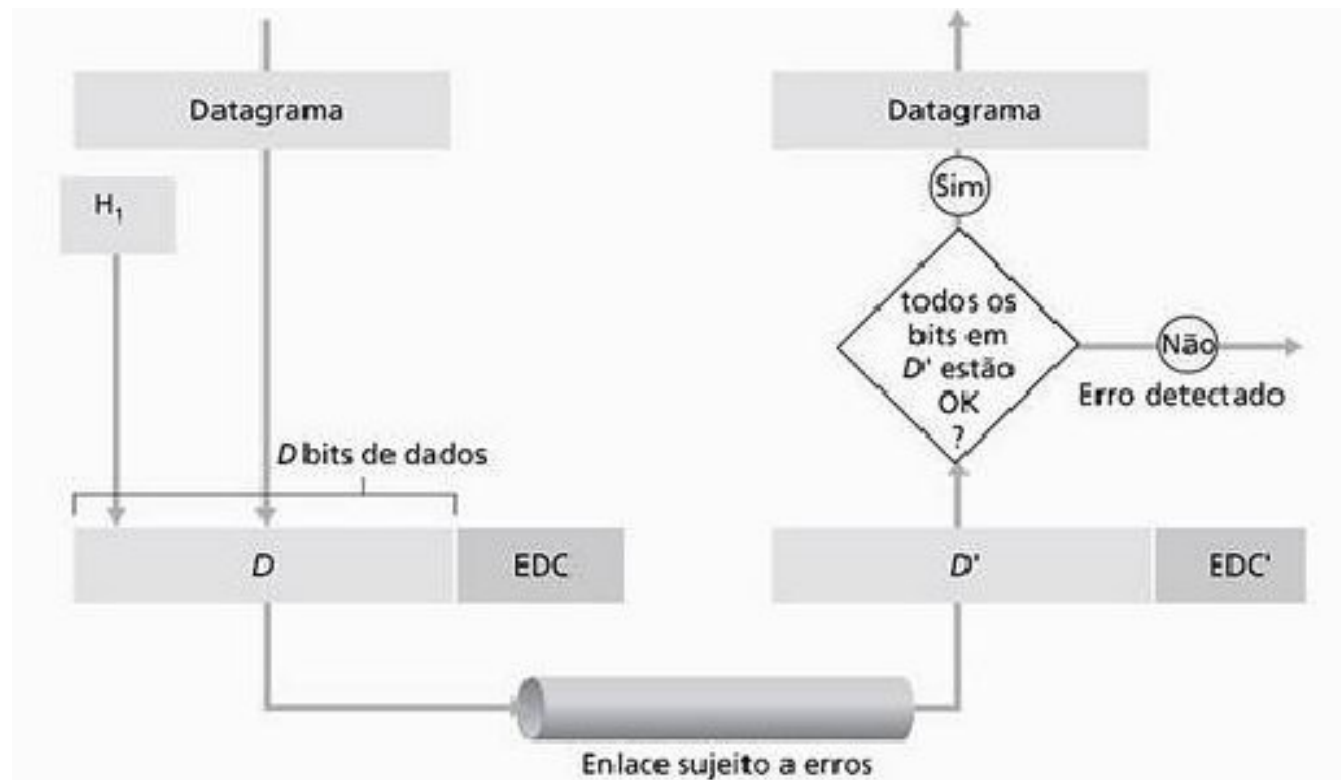
- “**Error Detection and Correction - EDC**” .. bits de detecção e correção de erros (contemplam “bits” de redundância).
- “D” bits de dados estão protegidos por verificação de erro, podendo ou não incluir campos de cabeçalho da mensagem.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2 – Detecção e Correção de Erros

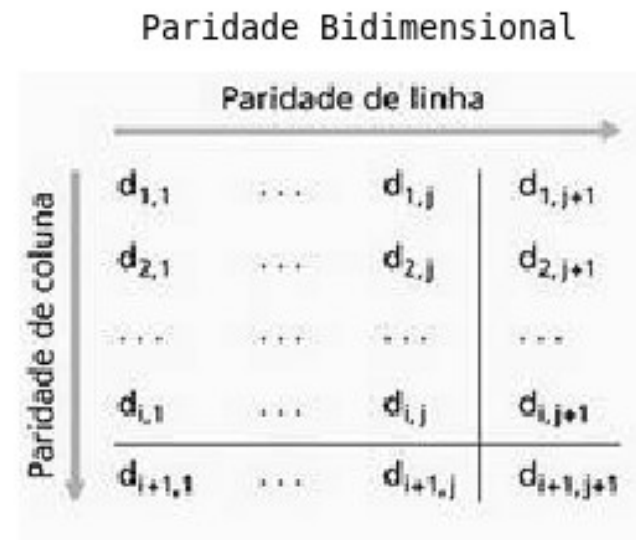
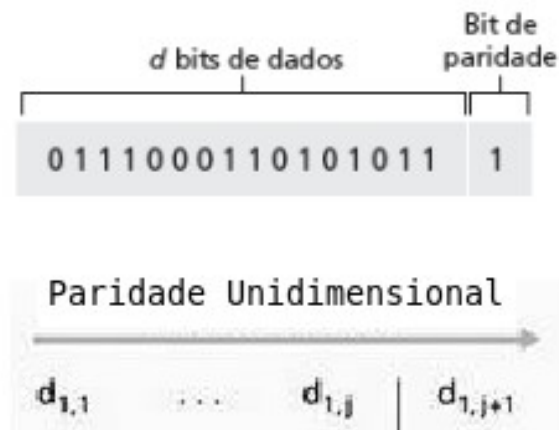
- Detecção de ERRO não é 100% confiável, ou seja, protocolo pode perder (não identificar) alguns erros, embora raramente ocorra.
- .. maior campo EDC gera melhor detecção e correção >> maior “overhead” ou redundância sobre os dados propriamente ditos.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

5.2.1 – Verificação por Paridade

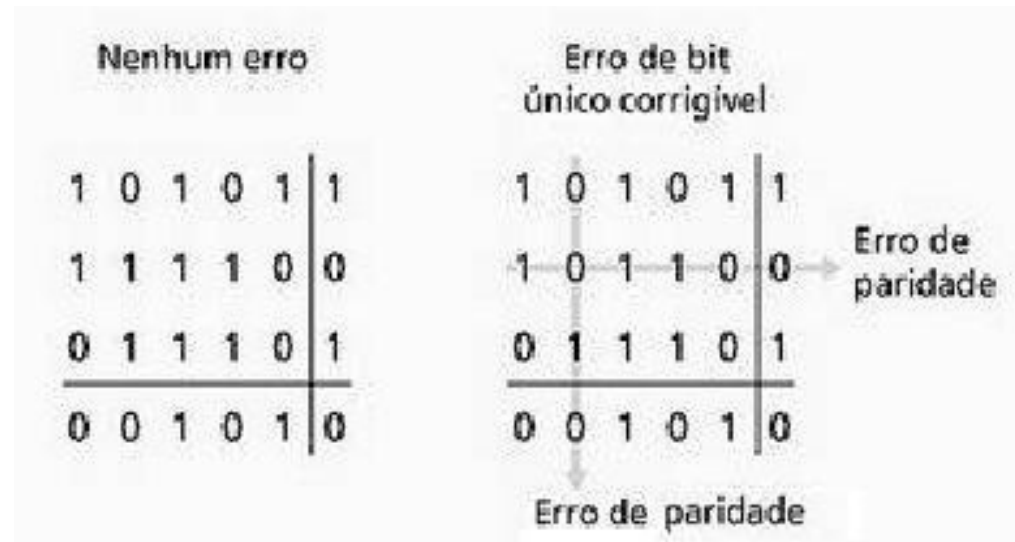
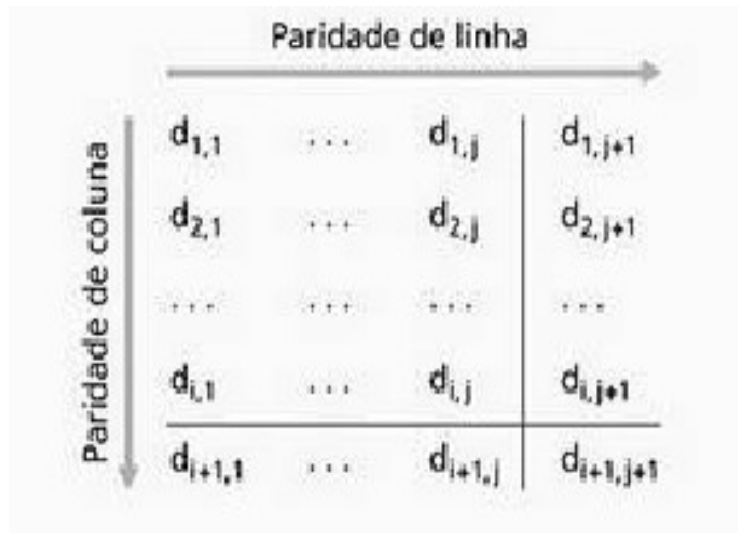
- Códigos de Detecção por Paridade .. paridade pode ser aplicada a uma sequência de bits em 01 ou 02 dimensões:
- “**paridade par**” .. inclui “bit” adicional de modo que o nro total de “1s” nos “d+1” bits (informação original + paridade) seja “par”.
- “**paridade ímpar**” .. inclui “bit” adicional de modo que o nro total de “1s” nos “d+1” bits (informação original + paridade) seja “ímpar”.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.1 – Verificação por Paridade

- Códigos de Detecção por Paridade:
- “**paridade bidimensional**” .. “d” “bits” de dados são divididos em “i” filas e “j” colunas e na sequência o bit de paridade é calculado para cada linha e para cada coluna >> paridade bidimensional.
- “ $i + j + 1$ ” “bits” de paridade resultantes compreendem os “bits” de detecção de erros do quadro da camada de enlace.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.1 – Verificação por Paridade

- “**código de hamming**” .. código de bloco linear desenvolvido por Richard Hamming e utilizado no processamento de sinais e nas telecomunicações .. transferência segura e eficiente.
- ... códigos binários de Hamming são baseados em códigos de paridade sobre um bloco de dados de comprimento fixo.

Posição do bit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
bits codificados	p1	p2	d1	p4	d2	d3	d4	p8	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	p16	d12	d13	d14	d15	
bits de paridade	p1	X		X		X		X		X		X		X		X		X		X	
	p2		X	X			X	X			X	X			X	X			X	X	
	p4				X	X	X	X					X	X	X	X					X
	p8								X	X	X	X	X	X	X						
	p16																X	X	X	X	X

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.1 – Verificação por Paridade

- “**códigos binários**” .. baseados em códigos de paridade sobre um bloco de dados de comprimento fixo.
- “**bloco de dados**” .. também denominado de "palavra" contém “n” bits, este parâmetro pode assumir apenas valores inteiros específicos, que resultam da especificação do código.

Posição do bit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
bits codificados	p1	p2	d1	p4	d2	d3	d4	p8	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	p16	d12	d13	d14	d15	
bits de paridade	p1	X		X		X		X		X		X		X		X		X		X	
	p2		X	X			X	X			X	X			X	X			X	X	
	p4				X	X	X	X					X	X	X	X					X
	p8								X	X	X	X	X	X	X						
	p16																X	X	X	X	X

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.1 – Verificação por Paridade

- “**bloco de dados**” .. combinações de bits do bloco de dados pode ser selecionado como desejado, o que significa que todas as combinações de bits arbitrárias são permitidas.
- “**Código de Paridade do Código de Hamming**” .. obtido a partir da palavra de dados, inserindo pontos de controle (bits de paridade).

Posição do bit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
bits codificados	p1	p2	d1	p4	d2	d3	d4	p8	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	p16	d12	d13	d14	d15	
bits de paridade	p1	X		X		X		X		X		X		X			X		X		
	p2		X	X			X	X			X	X			X	X			X	X	
	p4				X	X	X	X					X	X	X	X					X
	p8								X	X	X	X	X	X	X						
	p16																X	X	X	X	X

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.1 – Verificação por Paridade

- **“palavra de dados + controle”** .. em cada palavra de dados, de comprimento “n”, são inseridos um número fixo “k” de pontos de controle, ficando a palavra de código com um comprimento $N = “n + k”$.
- **“observação”** .. para a palavra de código, apenas certas combinações de bits são possíveis, uma vez que somente os pontos de controle tem informação derivada da palavra de dados.

Posição do bit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
bits codificados	p1	p2	d1	p4	d2	d3	d4	p8	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	p16	d12	d13	d14	d15
bits de paridade	p1	X		X		X		X		X		X		X			X		X	
	p2		X	X			X	X			X	X			X	X			X	X
	p4				X	X	X	X					X	X	X	X				X
	p8								X	X	X	X	X	X	X					
	p16																X	X	X	X

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.1 – Verificação por Paridade

- “**código de hamming**” .. inserção de “k” bits em uma palavra de dados de “n” bits resultando em uma palavra de “n + k” e, onde, $2^k - 1$ representa o total de combinações, onde “N = n + k”
- ... para a palavra de código, apenas certas combinações de bits são possíveis, uma vez que somente os pontos de controle tem informação derivada da palavra de dados.
- e.g., considere 03 bits de paridade, então o comprimento da palavra será necessariamente “7” >> obtido de “n + k = $2^k - 1$ ”, ou seja, “n = $2^k - k - 1$ ”
- .. para o exemplo em questão onde k = 3 tem-se n = $2^3 - 3 - 1$, ou seja, n = $8 - 3 - 1$ >> n = 4 (comprimento da palavra de dados).

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

5.2.2 – Soma Verificação

- “**soma verificação**” - “d” bits de dados são tratados como uma sequência de números inteiros de “k” bits.
- ... utilizada para detectar “erros”, p.ex., bits invertidos no pacote transmitido (Camada Transporte da Arq. TCP/IP)
- “**emissor**” .. soma pares de sequências de 16 bits do segmento em (compl. 1) e insere o resultado no campo soma de verificação do UDP.
- “**receptor**” .. recalcula-se a soma verificação do segmento recebido e compara-se com o valor “check sum” recebido no segmento, ou seja:
 - se NÃO => erro detectado.
 - se SIM => nenhum erro detectado.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.2 – Soma Verificação

- e.g., como exemplo simples do cálculo da soma de verificação, considere 03 palavras de 16 bits cada, quais sejam: 0110.0110.0110.0000; 0101.0101.0101.0101 e 1000.1111.0000.1100.
- 0110.0110.0110.0000 >> 1a Palavra de 16 bits
- 0101.0101.0101.0101 >> 2a Palavra de 16 bits

- 1011.1011.1011.0101 >> 1a + 2a Palavras de 16 bits.
- 1000.1111.0000.1100 >> 3a Palavra

- **1** 0100.1010.1100.0001 >> SOMA da 1a, 2a e 3a palavras !!
- .. considerar o vai-um do bit mais a esquerda !

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.2 – Soma Verificação

- .. continuação do cálculo do “soma verificação”.
- 0100.1010.1100.0001 >> resultado
- 1 >> Vai-Um
- -----
- 0100.1010.1100.0010 >> resultado final

- “**soma verificação**” .. é o complemento de 1 da soma 0100.1010.1100.0010, ou seja, 1011.0101.0011.1101 = soma de verificação.
- “**verificação**” .. no destinatário, todas as 04 palavras de 16 bits são somadas, inclusive a soma de verificação.
- .. se nenhum erro for introduzido no pacote, a soma no destinatário será, 1111.1111.1111.1111, se um dos bits for um “0”, sabe-se então que um erro foi introduzido no pacote.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.2 – Soma Verificação

- e.g., como exemplo simples do cálculo da soma de verificação, considere 03 palavras de 16 bits cada, quais sejam: 0110.0110.0110.0000; 0101.0101.0101.0101 e 1000.1111.0000.1100.

0100.1010.1100.0010 >> Soma das 03 Palavras de 16 bits.

- “complemento de 1” .. obtido pela conversão de todos os 0 em 1 e de todos os 1 em 0, ou seja, complemento de 1 da soma de 0100.1010.1100.0010 >> 1011.0101.0011.1101.
- **“soma verificação”** .. 1011010100111101 (16 bits)

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.2 – Soma Verificação

- “**soma verificação**” - calcula-se o complemento de 1 da soma de seqüências de 16 bits dos dados recebidos (inclusive o campo de soma de verificação) e verifica se o resultado contém somente bits “1”.
- ... se qualquer um dos bits é “0” => erro !!
- Soma Verificação na Arq. TCP/IP:
- Protocolo UDP .. calcula-se a soma verificação sobre todos os campos, incluindo os campos de cabeçalho e dados.
- Protocolo IP .. calcula-se a soma verificação somente sobre os campos do cabeçalho, ou seja, o campo de dados não é considerado.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

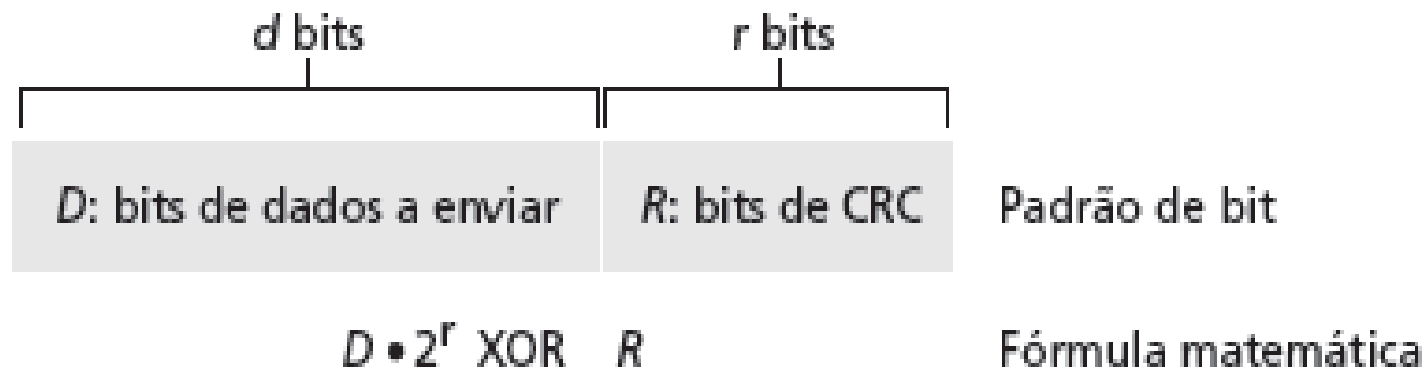
5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- **“Cyclic Redundancy Check” (CRC)** .. algoritmo de código cíclico mais utilizado em redes de computadores.
- ISO especifica um algoritmo similar denominado FCS (Frame Check Sequence) utilizado em seus protocolos IEEE802.
- CRC contempla o “produto de bits” de verificação de uma “primitiva”, cuja amostragem é definida segundo um critério.
- ... bits escolhidos fazem parte do “fator” ou “polinômio gerador” e, portanto, é transmitido o produto, ou seja, “primitiva * fator”.
- .. no destino faz-se a divisão do que é recebido pelo fator » se resto é zero, significa ausência de erro ou erro não detectável.
- ... método de divisão é específico e o polinômio gerador usado determinam o leque de erros de transmissão que podem ser detectados.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- **“Código de Redundância Cíclica” (CRC)** .. dado um padrão de bits formados por “ $r+1$ ” bits denominado Polinômio Gerador “ G ”, calcula-se “ R ” (resto) de modo que “ $D \cdot 2^r \text{ XOR } R$ ” seja divisível por “ G ”.
- ... tanto remetente quanto receptor conhecem “ G ”, assim receptor verifica se o resto da divisão de $\langle D, R \rangle$ por “ G ” = zero >> nenhum erro!
- ... utilizado no Padrão Ethernet, Padrão 802.11 e ATM.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- e.g., seja uma primitiva .. sequência de “n” bits que pode ser representada por um polinômio de grau “n-1”.
- polinômio = somatório $b_i * x^i$ com $i = [0 .. (n-1)]$ onde b_i é o coeficiente do bit na posição “i” e x^i indica o literal do bit na posição “i”.
- e.g., .. utilizando as regras apresentadas, represente a sequência de bits “10011” na forma polinomial.

= “ $1*x^4 + 0*x^3 + 0*x^2 + 1*x + 1$ ” .. (parcelas $0 * x^n = 0$ >> pode-se removê-las)

= “ $x^4 + 0 + 0 + x + 1$ ”

= “ $x^4 + x + 1$ ” .. (representação final e simplificada)

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- e.g., calcule o polinômio cuja primitiva seja igual a “1 0 0 1 1” e utilize como polinômio gerador ou fator a sequência “1 1 0 0”.
- 1º passo .. representação polinomial
- “1 0 0 1 1” = $1 \cdot x^4 + 0 \cdot x^3 + 0 \cdot x^2 + 1 \cdot x^1 + 1 \cdot x^0 = x^4 + x + 1$
- “1 1 0 0” = $1 \cdot x^3 + 1 \cdot x^2 + 0 \cdot x^1 + 0 \cdot x^0 = x^3 + x^2$

$$= (x^4 + x + 1) * (x^3 + x^2) = x^7 + x^6 + x^4 + x^3 + x^3 + x^2$$

... $x^7 + x^6 + x^4 + \underline{x^3} + \underline{x^3} + x^2$ » mas como $x^3 + x^3$ é 0 ...

$$= (x^4 + x + 1) * (x^3 + x^2) = x^7 + x^6 + x^4 + x^2$$

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

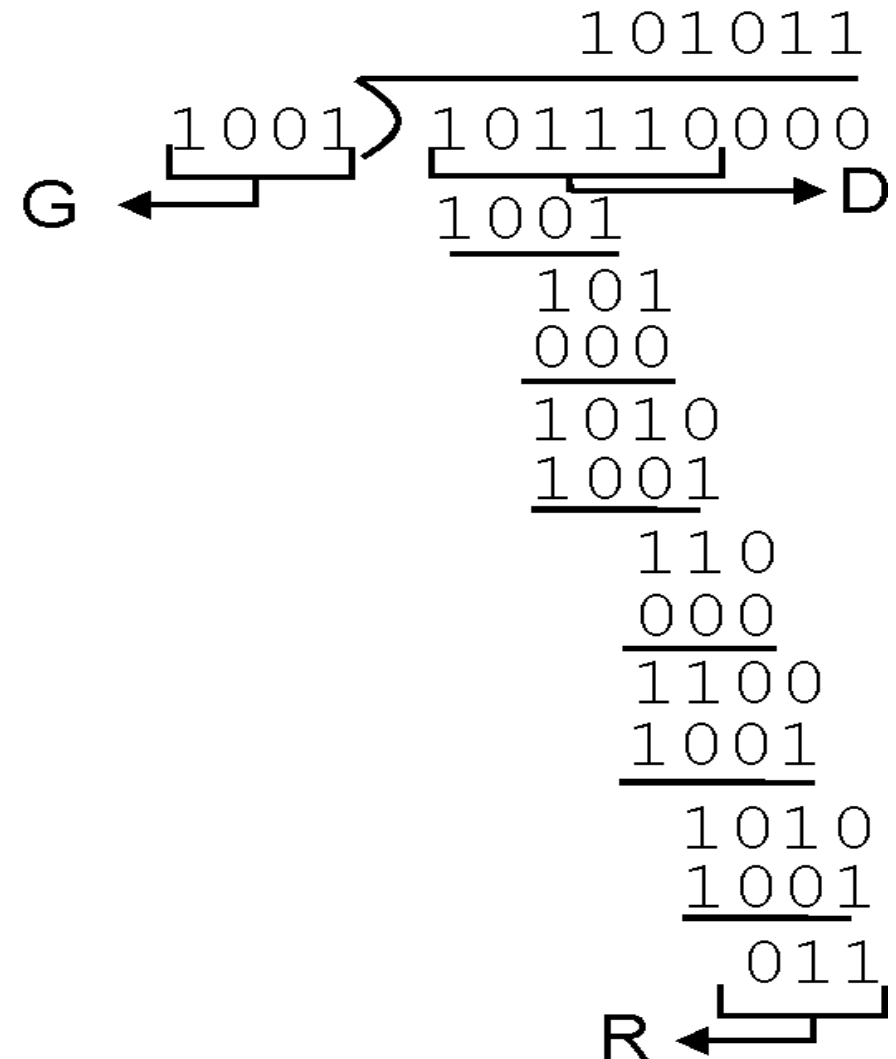
... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- Sejam as operações binárias (ou-exclusivo):
- $0 + 0 = 0 - 0 = 0 \quad / \quad 0 + 1 = 0 - 1 = 1$
- $1 + 0 = 1 - 0 = 1 \quad / \quad 1 + 1 = 1 - 1 = 0$
- ... não há “carry bit” na adição e nem “borrow bit” na subtração, ou seja, para todo “i” ... $x^i + x^i = 0$ ($1 + 1 = 0$ ou $0 + 0 = 0$)
- para multiplicar 02 códigos de dados, basta multiplicar os polinômios correspondentes aos códigos de dados.
- e.g., seja a multiplicação dos polinômios $(x^4 + x + 1)$ por $(x^3 + x^2)$, cujo resultado é .. $x^7 + x^6 + x^4 + x^3 + x^3 + x^2$
... $x^7 + x^6 + x^4 + \underline{x^3} + \underline{x^3} + x^2$ » mas como $x^3 + x^3$ é 0 ...

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- **“resultado a ser obtido” ..**
 $D * 2^r \text{ XOR } R = n * G$
- .. que pode ser reescrito como
 $“D * 2^r “ = “n * G” \text{ XOR } “R”.$
- Ao dividirmos $“D * 2^r“$ por $“G”$,
obtem-se um quociente $“Q”$ mais
um resto $“R”$.
- .. ao acrescentarmos o resto $“R”$ a
parcela original $“D * 2^r“$, obtém-se
 $“D * 2^r \text{ XOR } R”$ que é múltiplo de $“G”$,
ou seja, $“n * G” !!$



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- e.g. #1, considere uma msg. original com 14 (quatorze) bits 11.01.00 11.10.11.00 a qual são adicionados 03 bits para detecção de erro.
- .. neste sentido desloca-se a esquerda 03 bits, acrescentando “000” a direita, para então dividirmos a sequência obtida pelo “fator”.
- 11010011101100 000 « input right padded by 3 bits
- 1011 « divisor (4 bits) = $x^3 + 0.x^2 + x + 1 = x^3 + x + 1$
- -----
- 01100011101100 000 « result
- .. algoritmo atua nos bits diretamente acima do divisor em cada etapa, sendo que o resultado dessa iteração é o XOR bit a bit do polinômio divisor com os bits acima dele (mensagem original deslocada 3 bits).

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- .. na sequência, o divisor é deslocado para a direita para se alinhar com o 1 bit restante mais alto na entrada e o processo se repete até que o divisor alcance a extremidade direita da linha de entrada.
- 01100011101100 000 « result .. observe que os primeiros 04 bits são
« o XOR com o divisor abaixo, o resto dos bits
« não são alterados.
- 01011 « divisor ...
- 00111011101100 000 « result ..
- 001011 « divisor ..
- 00010111101100 000 « result ..
- 0001011 « divisor ..
- 00000001101100 000 « observe ..

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- 000000001101100 000 « observe que o divisor se move para alinhar
« com o próximo 1 no dividendo (uma vez que
« o quociente para essa etapa era zero)
- 000000001011 « divisor ..
- 00000000110100 000 « result ..
- 000000001011 « divisor ..
- 00000000011000 000 « result ..
- 0000000001011 « divisor ..
- 00000000001110 000 « result ..
- 000000000001011 « divisor ..
- 00000000000101 000 « result ..
- 000000000000101 1 « divisor ..
- 000000000000000 100 « remainder (3 bits).

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- e.g. #2, considere a mensagem formada por 04 bits = 1001 e cuja representação na forma polinomial seja $x^3 + 0.x^2 + 0.x + 1$.
 - .. seja a adição de 03 bits de verificação (ainda serão calculados), então, basta multiplicar por “ x^3 ” ou receber 03 “0s”, resultando no polinômio $(x^3 + 1) * x^3 = x^6 + x^3$ que é o mesmo que 1001 000.
 - .. considere que o polinômio gerador seja “ $x^2 + 1$ ”, logo, podemos efetuar a divisão de “ $x^6 + x^3$ ” (dividendo) por $g(x) = “x^2 + 1”$ (divisor)
-
- $x^6 + x^3$ (dividendo) ... $x^2 + 1$ (divisor)
 - $x^6 + \quad + x^4$ x^4 (quociente)
 - $x^4 + x^3$ « resultado
 - $x^4 + \quad + x^2$ $x^4 + x^2$ (quociente)
 - $x^3 + x^2$ « resultado

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- .. considere que o polinômio gerador seja “ $x^2 + 1$ ”, logo, podemos efetuar a divisão de “ $x^6 + x^3$ ” (dividendo) por $g(x) = “x^2 + 1”$.
- $x^6 + x^3$ (dividendo) ... $x^2 + 1$ (divisor)
- ...
- $x^3 + x^2$ « resultado
- $x^3 + \quad + x$ « $x^4 + x^2 + x$ (quociente)
- $x^2 + x$ « resultado
- $x^2 + \quad + 1$ « $x^4 + x^2 + x + 1$ (quociente)
- $x + 1$ « resultado .. não é mais divisível !!
- “code word” = $x^6 + x^3 + x + 1 = 1001 \text{ } 011$

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- e.g. #3, considere a mensagem formada por 07 bits = 1001 011.
- .. considere que o polinômio gerador seja “ $x^2 + 1$ ”, logo, podemos efetuar a divisão de “ $x^6 + x^3 + x$ ” (dividendo) por $g(x) = “x^2 + 1”$ (divisor)
- $x^6 + x^3 + x + 1$ (dividendo) ... $x^2 + 1$ (divisor)
- $x^6 + \quad + x^4 \quad + 1$ x^4 (quociente)
- $x^4 + x^3 \quad + x + 1$ « resultado
- $x^4 + \quad + x^2 \quad + 1$ $x^4 + x^2$ (quociente)
- $x^3 + x^2 + x + 1$ « resultado
- $x^3 + \quad + x + 1$ « $x^4 + x^2 + x$ (quociente)
- x^2 « resultado

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- .. considere que o polinômio gerador seja “ $x^2 + 1$ ”, logo, podemos efetuar a divisão de “ $x^6 + x^3 + x$ ” (dividendo) por $g(x) = “x^2 + 1”$ (divisor)
- $x^6 + x^3 + x + 1$ (dividendo) ... $x^2 + 1$ (divisor)
- ...
- $x^2 + \quad + 1$ « resultado
- $x^2 + \quad + 1$ « $x^4 + x^2 + x + 1$ (quociente)
- $0 + \quad + 0$ « resultado é 0 (zero)
- “code word” transmitida = $x^6 + x^3 + x + 1 = 1001\ 011$ é divisível por G, logo, não houve erro na transmissão ou erro indetectável.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- e.g. #4, considere a mensagem formada por 04 bits = 1001 e cuja representação na forma polinomial seja $x^3 + 1$.
 - .. seja a adição de 03 bits de verificação (ainda serão calculados), então, basta multiplicar por “ x^3 ” ou receber 03 “0s”, resultando no polinômio $(x^3 + 1) * x^3 = x^6 + x^3$ que é o mesmo que 1001000.
 - .. considere que o polinômio gerador seja “ $x + 1$ ”, logo, podemos efetuar a divisão de “ $x^6 + x^3$ ” (dividendo) por $g(x) = “x + 1”$.
-
- $x^6 + x^3$ (dividendo) ... $x + 1$ (divisor)
 - $x^6 + \quad + x^5$ x^5 (quociente)
 - $x^5 + x^3$ « resultado
 - $x^5 + \quad + x^4$ $x^5 + x^4$ (quociente)
 - $x^4 + x^3$ « resultado

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- .. considere que o polinômio gerador seja “ $x^2 + 1$ ”, logo, podemos efetuar a divisão de “ $x^6 + x^3$ ” (dividendo) por $g(x) = “x^2 + 1”$.
- $x^6 + x^3$ (dividendo) ... $x + 1$ (divisor)
- ...
- $x^4 + x^3$ « resultado
- $x^4 + x^3$ « $x^5 + x^4 + x^3$ (quociente)
- .. resto igual zero .. « resultado
- **“code word”** = “dataword” + “remainder”
- **“code word”** = $x^6 + x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0x^0 = x^6 + x^3$
- **“code word”** = 1001 000 = $x^6 + x^3$

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- Projetar polinômios geradores para detectar a maior classe possível de erros de comunicação não é uma “tarefa fácil”.
- ... um bom polinômio gerador tem pelo menos um fator $(x + 1)$, além disso, em sistemas distribuídos isto deve ser compartilhado com todos os pares para que possam detectar o erro ou não.
- CRC-12 é um polinômio largamente utilizado, para gerar soma verificação - “checksum” de grau 12
- $x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + 1$
- “**observação**” .. grau é 12, então este código pode detectar rajadas de erros de até 12 bits, não somente rajadas de 12 bits.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- A CCITT (hoje ITU-T) recomenda polinômio gerador de grau 16.

$$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$

- ... grau é 16, então este código pode detectar rajadas de erros de até 16 bits, não somente rajadas de 16 bits.
- Em aritmética binária, este código pode ser escrito como:
- $(x+1) * (x^{15} + x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$
- ... pode-se ver que qualquer polinômio multiplicado pelo fator $(x+1)$ tem um número par de parcelas (ie, bits não zero).
- ... verificar o resultado (nro par de parcelas) ... !!

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- Isto significa que todo “E” com um número ímpar de parcelas, produzido por um número ímpar de erros de bits é detectável;
- CRC-CCITT detecta
- 100% em caso de 2 bits de erro;
- 99,997% em caso de rajadas de 17 bits;
- 99,998% em rajadas maiores que 17 bits.
- O polinômio utilizado pelo protocolo BSC (Binary Synchronous Communication) da IBM é muito próximo deste polinômio:
- $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.2 - Detecção e Correção de Erros

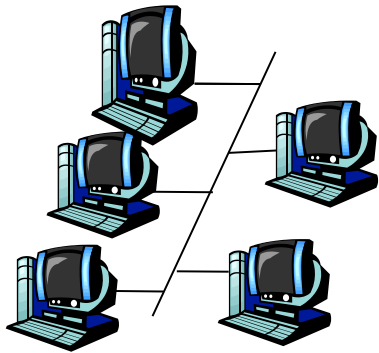
... 5.2.3 – Código de Redundância Cíclica

- Comitê IEEE 802 padronizou um CRC-32 bits:
- $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$
- Codificação e Decodificação do “checksum” CRC exigem tempo e podem degradar o desempenho do autômato;
- ... implementação é tipicamente feita em “hardware”, por motivos óbvios de necessidade de esforço computacional.
- Observe-se que o desempenho do algoritmos tem uma linearidade com o grau do polinômio gerador.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

5.3 – Protocolos de Acesso Múltiplo

- “**tipos de enlaces**” .. “Ponto a Ponto” (PPP) e “Broadcast”
- “Point-to-Point Protocol” (PPP) .. contém um único remetente em uma extremidade do enlace e um único receptor na outra extremidade.
- ... PPP para acesso discado; PPP entre Computador e “host”.



fio compartilhado (p. e.,
Ethernet cabeado)



RF compartilhada
(p. e., WiFi 802.11)



RF compartilhada
(satélite)

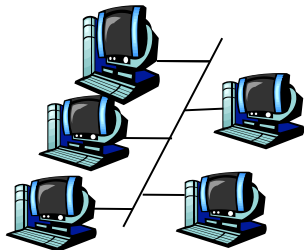


humanos em uma festa
(ar e acústica
compartilhados)

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3 – Protocolos de Acesso Múltiplo

- **“tipos de enlaces”** .. “Ponto a Ponto” (PPP) e “Broadcast”
- “Broadcast” .. fio ou meio compartilhado acomoda vários remetentes e receptores, todos conectados ao mesmo canal de transmissão.
- p.ex., “upstream” Hybrid Fiber Coaxial (HFC); Ethernet ou LAN 802.3; WiFi 802.11 ou LAN Wireless; Satélite, etc.
- ... muito utilizados em redes locais, redes que estão geograficamente concentradas em um único edifício, p.ex., empresa ou campus.



fio compartilhado (p. e.,
Ethernet cabeado)



RF compartilhada
(p. e., WiFi 802.11)



RF compartilhada
(satélite)



humanos em uma festa
(ar e acústica
compartilhados)

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3 – Protocolos de Acesso Múltiplo

- “**Protocolo Media Access Control**” (MAC) .. canal de “broadcast” é compartilhado, assim, 02 (duas) ou mais transmissões simultâneas causam interferência entre os nós.
- ... algoritmo distribuído determina como os nós compartilham o canal, ou seja, determina quando um nó pode transmitir.
- ... comunicação sobre o compartilhamento do canal deve usar o próprio canal, ou seja, não há canal “**out-of-band**” para coordenação.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3 – Protocolos de Acesso Múltiplo

- **“protocolo ideal de acesso múltiplo”** .. para um canal de difusão com velocidade R bps, as seguintes características são desejáveis:
 - 1) .. se apenas um nó tem dados para enviar, esse nó terá uma vazão de R bps, ou seja, utilização toda a capacidade do canal.
 - 2) .. se “ M ” nós têm dados para enviar, cada qual terá vazão de R/M bps, ou cada nó terá uma velocidade média de transmissão de R/M bps durante algum intervalo de tempo adequadamente definido.
 - 3) .. protocolo é descentralizado, isto é, não há um nó mestre que represente um único ponto de falha para a rede.
 - 4) .. protocolo simples de modo que sua implementação seja barata.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

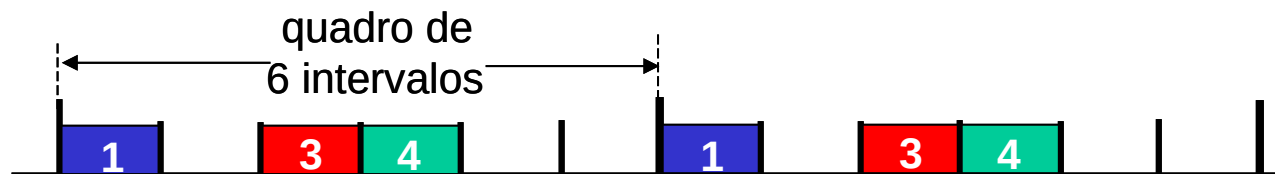
... 5.3 – Protocolos de Acesso Múltiplo

- “**classificação**” .. de modo geral um protocolo de acesso múltiplo se enquadra em uma das categorias: a) protocolos de divisão de canal; b) protocolos de acesso aleatório e c) protocolos de revezamento.
- “**protocolo de divisão de canal**” .. divide o canal em “pedaços menores” (intervalos de tempo, frequência, código) e aloca cada pedaço ao par de nós para uso exclusivo.
- “**protocolo de acesso aleatório**” .. canal não é dividido e, assim, permite colisões e se “recupera” de colisões.
- “**protocolo de revezamento**” .. os nós se revezam, mas os nós com mais dados para enviar podem receber mais tempo.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

5.3.1 – Protocolos de Divisão do Canal

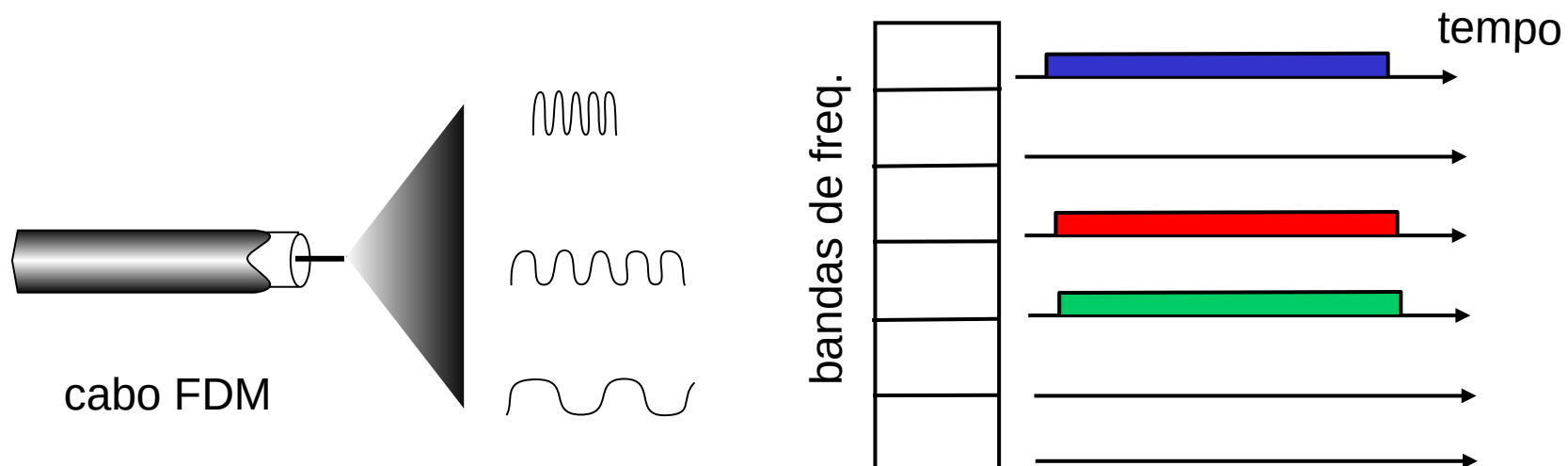
- **“Time Division Multiplexer” (TDM)** .. divide a largura de banda de um canal de difusão em intervalos de tempo.
- ... cada estação recebe intervalo de tamanho fixo, ou seja, mesmo tempo de transmissão de pacote a cada rodada.
- ... intervalos não usados ficam ociosos, mas concede-se a cada estação a possibilidade de transmitir de forma determinística.
- e.g., LAN de 6 estações onde as estações 1, 3, 4 têm pacote para transmitir, enquanto as estações 2, 5 e 6 não têm pacotes para transmitir, ou seja, os intervalos 2, 5 e 6 estão ociosos.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.1 – Protocolos de Divisão do Canal

- **“Frequency Division Multiplexer” (FDM)** .. divide a largura de banda de um canal de difusão em faixas de frequência.
- ... cada estação recebe uma largura (faixa) de banda de frequência e pode transmitir conjuntamente com os demais pares de nós.
- ... intervalos não usados ficam ociosos, mas concede-se a cada estação a possibilidade de transmitir de forma determinística.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.1 – Protocolos de Divisão do Canal

- **“Code Division Multiple Access” (CDMA)** .. partionamento do canal no Protocolo MAC e no qual atribui-se a cada nó um código exclusivo para codificar os bits de dados que envia / transmite.
- ... enquanto TDM e FDM atribuem aos nós intervalos de tempo e frequências às estações, CDMA atribui um código diferente a cada nó.
- ... cada estação utiliza este código exclusivo para codificar os bits de dados e transmitir os dados codificados.
- ... tendo-se o cuidado na escolha destes códigos, nós diferentes irão transmitir simultaneamente e os seus receptores irão receber os bits de dados codificados pelos respectivos remetentes.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- **“Protocolo de Acesso Aleatório” (ALOHA)** .. quando o nó tem um pacote a enviar, o nó transmite na velocidade “R” bps do canal.
- ... não há a coordenação “a priori” entre nós, assim, 02 ou mais nós transmitindo simultaneamente >> **“colisão”**
- ... neste caso, cada nó envolvido retransmite repetidamente seu quadro até que este passe sem colisão (sucesso na transmissão).
- ... na verdade, ao sofrer uma colisão, o nó espera um tempo aleatório antes de retransmitir o quadro, tempo este independente dos demais nós (tempos escolhidos de modo independente).
- ...

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- **“Protocolo de Acesso Aleatório” (ALOHA)** .. quando o nó tem um pacote a enviar, o nó transmite na velocidade “R” bps do canal.
- ...
- ... como após uma colisão os tempos de atraso são escolhidos de modo independente, é possível que 01 dos nós escolha um atraso mais curto que dos outros nós em colisão e alcance sucesso.
- ... protocolo especifica como detectar colisões bem como recuperar-se de colisões (p.ex., através da espera de tempos aleatórios / retransmissões adiadas).

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- Há dezenas (10s), se não centenas (100s), de protocolos de acesso aleatório descritos na literatura [Rom 1990] e [Bertsekas 1991].
- Exemplos de Protocolos MAC de “**Acesso Aleatório**” ..
- “ALOHA” [Abramson 1970; 1985]
- “CSMA” [Kleinrock 1975b]
- Ethernet [Metcalfe 1976]
- ... outros de acesso múltiplo com detecção de portadora (CSMA)

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

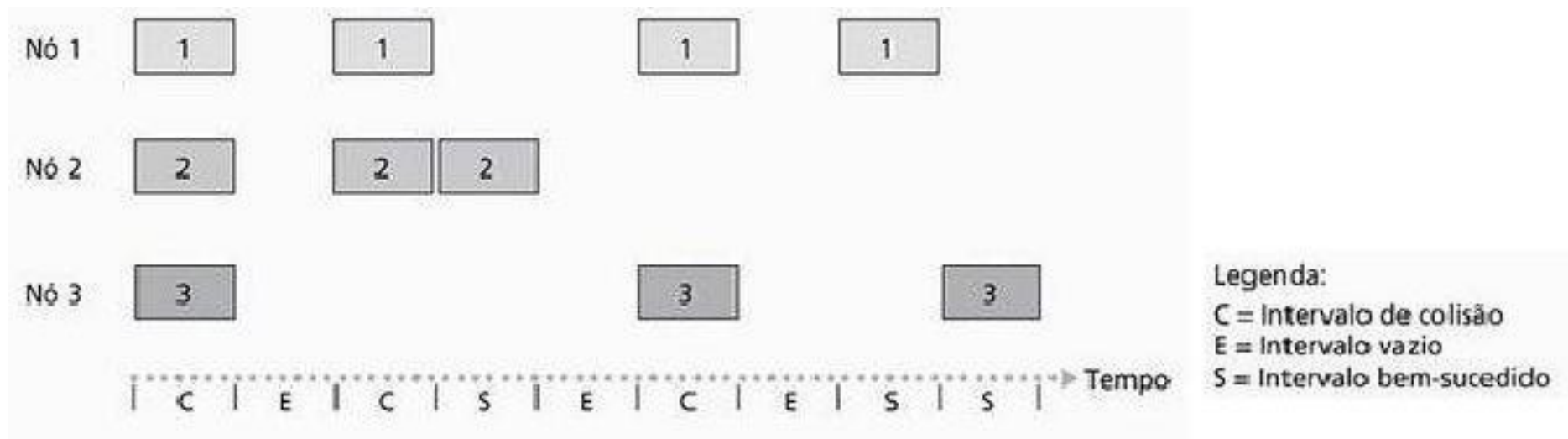
... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- Suposições do “**Slotted ALOHA**” :
- .. tempo particionado em intervalos de mesmo tamanho (“slotted”), sendo que 01 “slot” permite a transmissão de 01 quadro de L bits em um contexto em que todos os quadros tem mesmo tamanho.
- ... tempo é particionado em “slots” de mesmo tamanho, assim, os nós começam a transmitir somente no início de cada “slot”.
- ... nós são sincronizados, pois transmitem no início do “slot” e, assim, sabem onde se iniciam os intervalos possíveis para transmissão.
- ... se 2 ou mais nós iniciarem a transmissão no mesmo intervalo, a sobreposição dos sinais gera “**colisão**” que todos os nós detectam.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

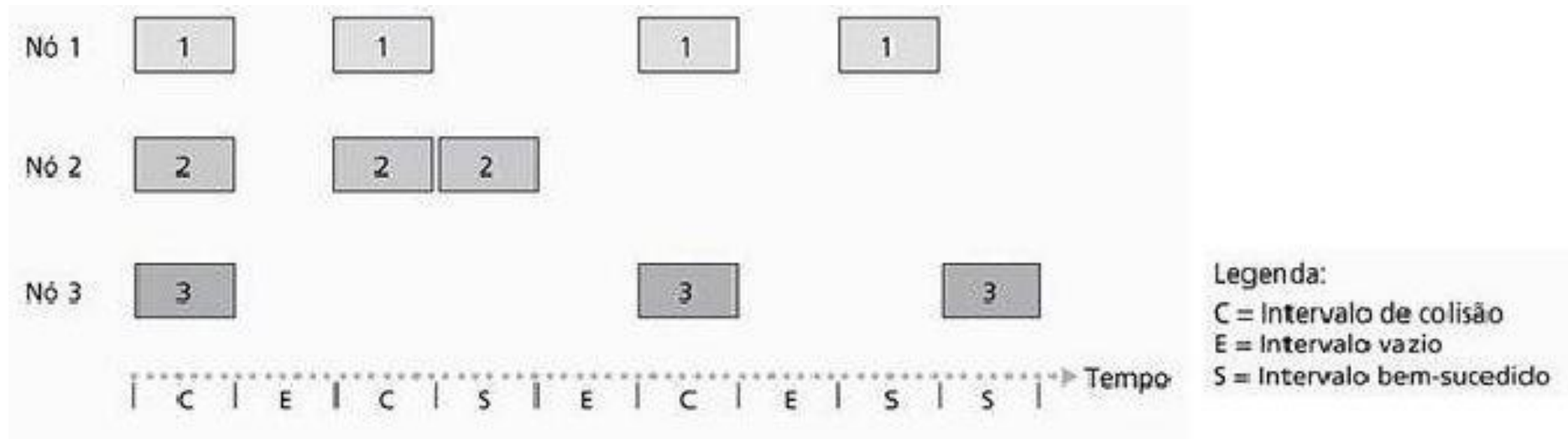
... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- Operação do “**Slotted ALOHA**”:
- ... quando nó obtém quadro novo, transmite no próximo intervalo.
- ... se não houver colisão, nó pode enviar novo quadro no próximo “slot” de tempo até finalizar o envio dos dados.
- ... se houver colisão, nó retransmite quadro em cada “slot” de tempo subsequente com probabilidade “p” até que haja sucesso.



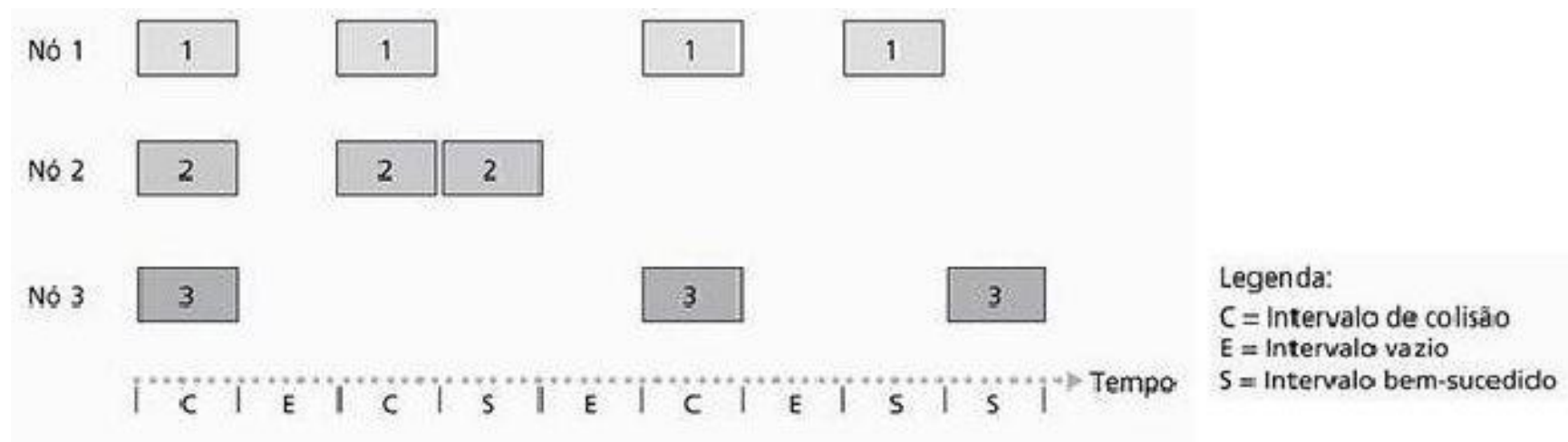
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo ... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- Operação do “**Slotted ALOHA**”:
- “**p**” .. probabilidade de que a retransmissão seja realizada no próximo intervalo >> transmitir no intervalo ou saltar o próximo intervalo.
- .. protocolo permite que um único nó transmita na velocidade total do canal, desde que seja o único nó ativo.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo ... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

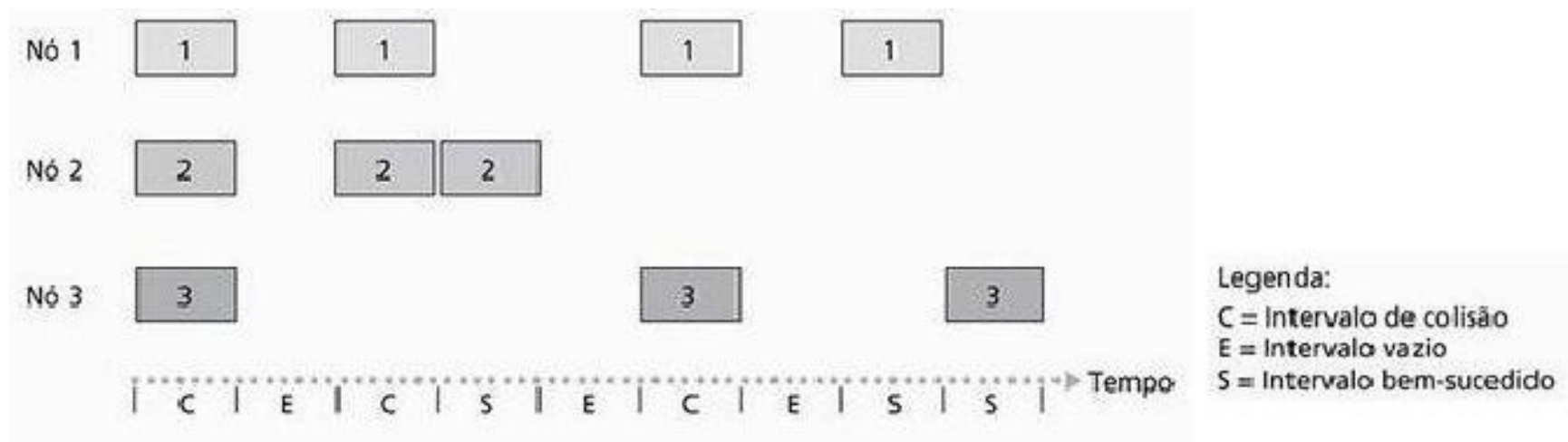
- “**vantagens**” do “Slotted” ALOHA:
- ... único nó pode transmitir continuamente na velocidade plena do canal quando for o único nó ativo dentre todos os nós.
- ... altamente descentralizado, porque cada nó detecta colisões e decide de modo independente quando retransmitir, mas requer que os intervalos sejam sincronizados nos nós (mesmos relógios).
- ... protocolo simples de implementar.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- “**desvantagens**” do “Slotted” ALOHA:
- .. intervalos com colisões são desperdiçados;
- .. intervalos ociosos (nenhum nó transmitindo);
- .. sincronismo de “clock” é necessário para marcação dos “slots”;
- nós podem detectar colisão em tempo menor do que o de transmissão.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- **“Eficiência” do “Slotted ALOHA”** - fração durante um longo período de tempo de “slots” bem sucedidos em um cenário com muitos nós ativos e com todos os nós com muitos quadros para transmitir.
- ... suponha “N” ativos nós com muitos quadros a transmitir, cada um transmitindo no “slot” de tempo com probabilidade “p”.
- ... probabilidade de um nó ter sucesso no “slot” = “ $p \cdot (1-p)^{(N-1)}$ ”, ou seja, é a probabilidade de que em um dado intervalo 01 dos nós transmita e os restantes “N – 1” nós não transmitam.
- ... como há “N” nós, a probabilidade de um nó arbitrário dentre todos os nós ter sucesso é $N \cdot p \cdot (1 - p)^{(N-1)}$.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

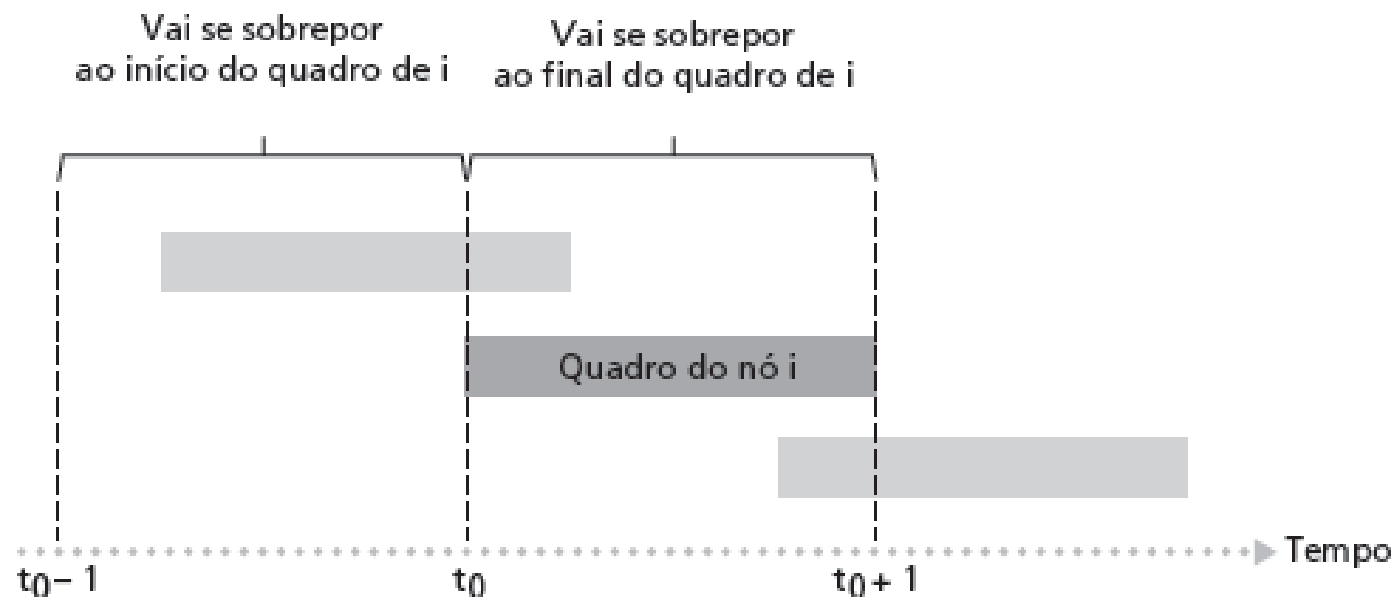
... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- ... para obtermos a eficiência máxima para N nós ativos, temos de encontrar um “ p^* ” que maximize essa expressão “ $N * p * (1-p)^{(N-1)}$ ”
- ... para obtermos a eficiência máxima para um grande número de nós ativos, considera-se o limite da expressão quando N tende ao infinito.
- ... após esses cálculos, descobre-se que a eficiência máxima é $1/e = 0,37$, ou seja, quando um grande número de nós tem muitos quadros a transmitir, então apenas 37% dos intervalos realiza um trabalho útil.
- **“Melhor das Hipóteses”** .. uso do canal com transmissões é de até 37% dos intervalos de tempo para transmissões com sucesso !

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- “**Protocolo ALOHA**” .. protocolo mais simples do que o “Slotted ALOHA”, permite a transmissão tão logo um nó deseje.
- ... como não há sincronismo de “clocks”, a probabilidade de colisão aumenta, pois o quadro enviado em t_0 irá colidir com outros quadros que sejam enviados no intervalo $[t_0-1, t_0+1]$.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- **“Eficiência” do “ALOHA Puro”** .. para este cálculo é necessário conhecer a probabilidade de sucesso de um determinado nó;
- ... probabilidade “p” do nó transmitir * probabilidade de nenhum outro nó transmitir em $[t_0-1, t_0]$ (intervalo anterior) * probabilidade de nenhum outro nó transmitir em $[t_0, t_0+1]$ (intervalo posterior).
- ... ou seja, $p \cdot (1-p)^{(N-1)} \cdot (1-p)^{(N-1)} = p \cdot (1-p)^{2 \cdot (N-1)}$
- ... escolhendo-se “p” e variando-se “N”, obtém-se: $1/2e = 0,18$.
- **“Eficiência” do “ALOHA Puro” = 18%** (pior que Slotted ALOHA).

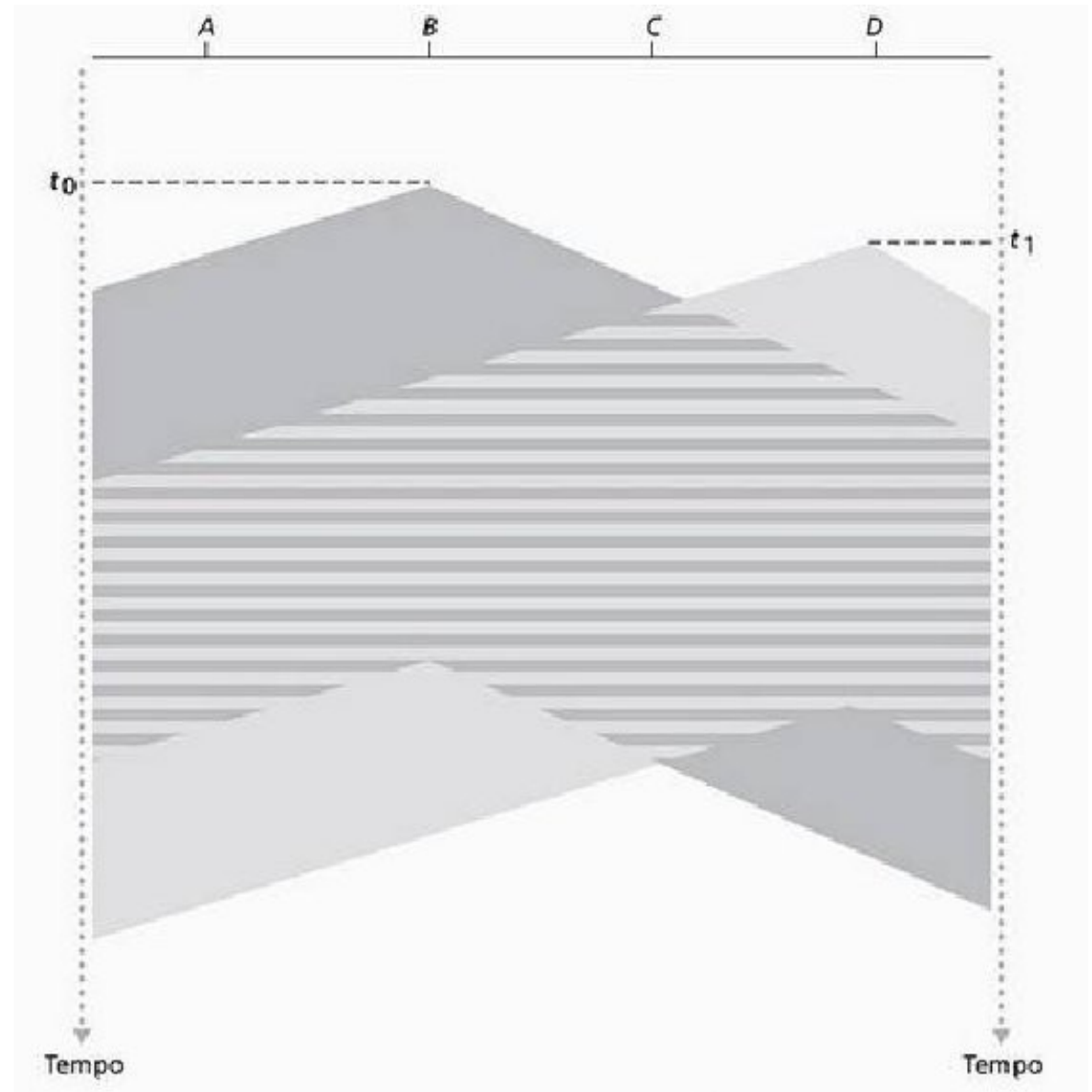
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- **“Protocolo Carrier Sense Multiple Access” (CSMA)** .. ouça antes de falar, se perceber o canal ocioso >> transmite quadro inteiro, se perceber canal ocupado >> postergue a transmissão.
- **“análise da possibilidade de colisões”** no CSMA:
- **“colisões podem ocorrer”** .. atraso de propagação significa que dois nós podem não ouvir a transmissão um do outro, assim, após algum tempo de transmissão a mesma irá gerar colisão;
- ... na colisão o tempo de transmissão de pacote é desperdiçado e, assim, todo o processo de acesso ao meio deve ser reiniciado.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo ... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- ... na colisão o tempo de transmissão de pacote é desperdiçado e, assim, todo o processo de acesso ao meio deve ser reiniciado.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

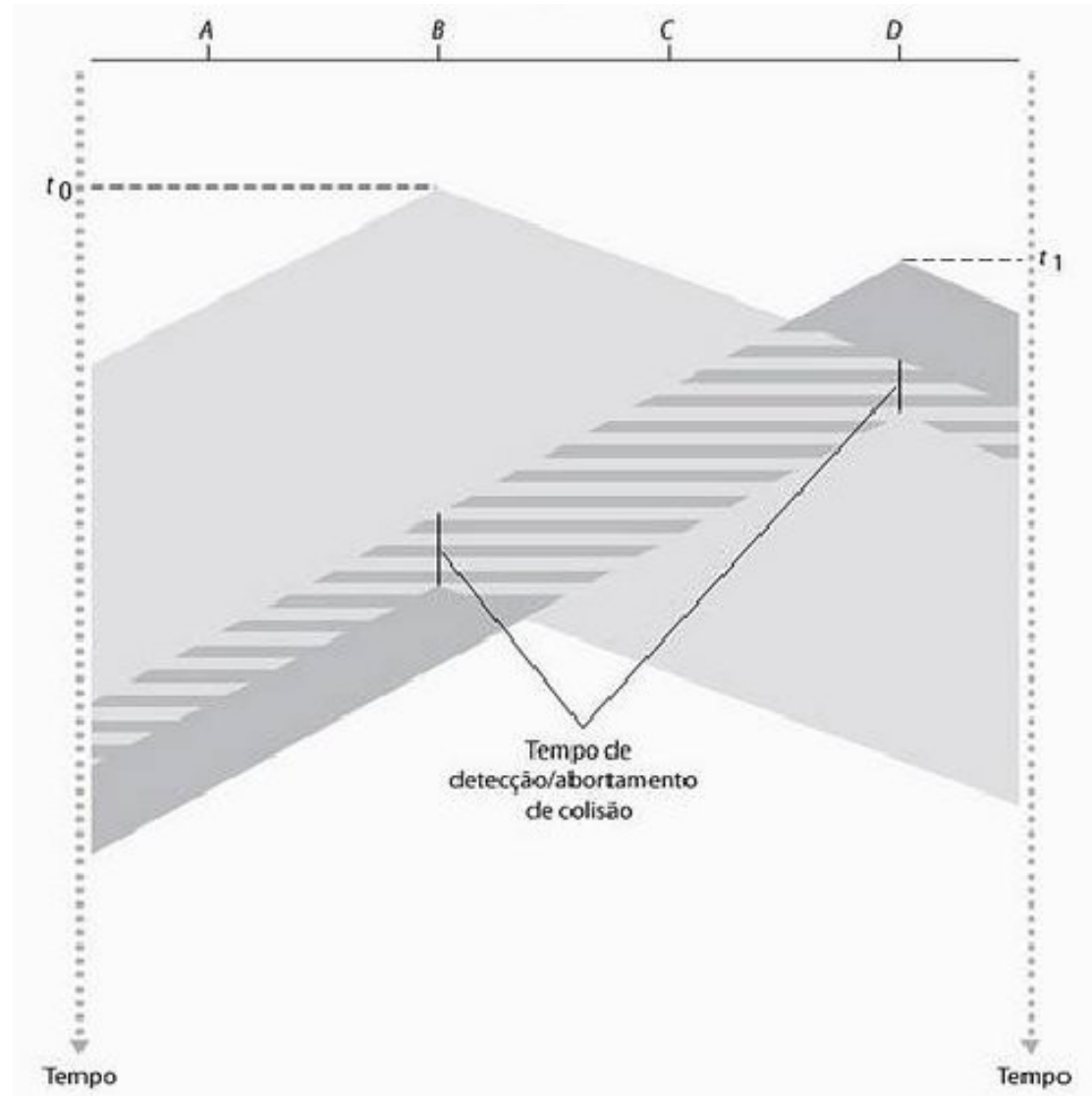
- **“propagação fim a fim de canal”** .. tempo necessário para que um sinal se propague de um dos extremos do canal para o outro.
- ... é evidente que o tempo de propagação fim a fim para um canal “broadcast” desempenha um papel crucial no seu desempenho.
- ... quanto mais longo for este atraso de propagação, maior será a chance de um nó que detecte portadora não perceber uma transmissão que já começou em outro nó da rede.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório

- “**CSMA/CD**”, ou seja, **CSMA** com “**Collision Detection**”
- ... colisões são detectadas dentro de pouco tempo, assim, transmissões colidindo são abortadas, reduzindo desperdício do canal.
- “**detecção de colisão em redes cabeadas**” .. possível medindo-se a intensidade do sinal no meio compartilhado e comparando com o sinal que está sendo transmitido.
- “**detecção de colisão em redes sem fio**” .. difícil de detectar, pois a intensidade do sinal recebido pode ser atenuada pela intensidade do sinal que está sendo transmitido.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo ... 5.3.2 – Protocolos de Acesso Aleatório



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

5.3.3 – Protocolos de Revezamento

- Protocolos MAC de “**Particionamento de Canal**”:
- “**alta carga**” .. compartilhamento do canal de modo eficaz e justo entre os nós, mesmo na presença de alta carga.
- “**baixa carga**” .. ineficaz com baixa carga, ou seja, $1/N$ largura de banda alocada mesmo que apenas 1 nó esteja ativo!
- Protocolos MAC de “**Acesso Aleatório**”:
- “**baixa carga**” .. eficaz, pois um único nó pode utilizar o canal totalmente, ou seja, na capacidade máxima de transmissão.
- “**alta carga**” .. sobrecarga em decorrência do nro. de colisões.

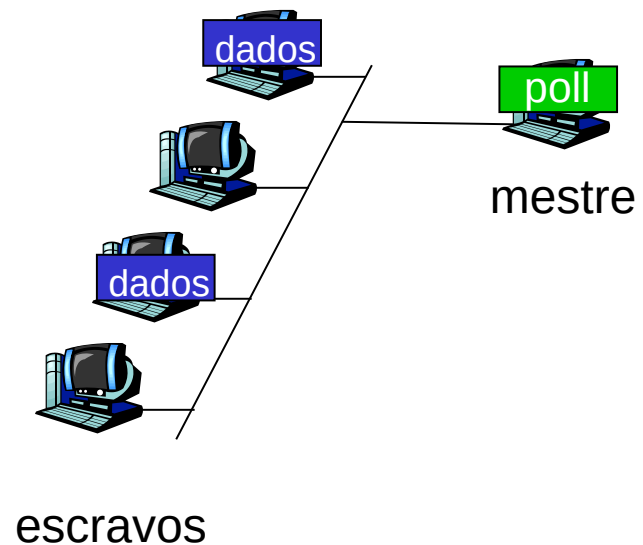
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.3 – Protocolos de Revezamento

- **“Revezando”** Protocolos MAC:
- ... procure o melhor dos 02 (dois) mundos, ou seja, vantagens de cada um e elimine ou atenuar as desvantagens ao combiná-los !

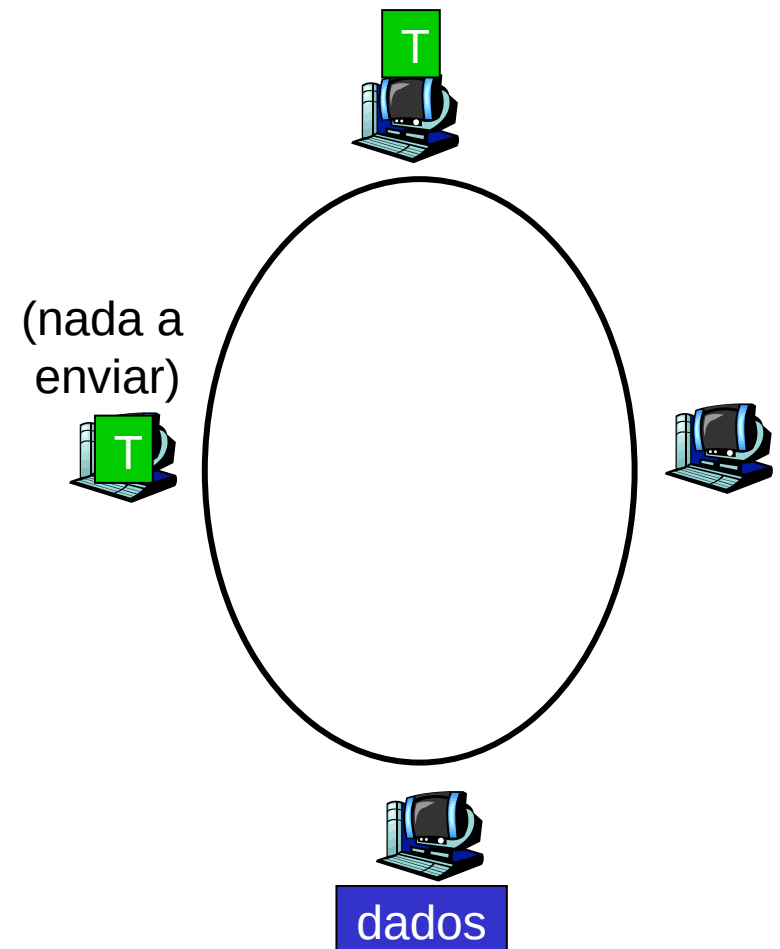
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo ... 5.3.3 – Protocolos de Revezamento

- **“Polling” / Seleção** - nó mestre “convida” nós escravos para se alternarem na transmissão de dados e normalmente utilizado em cenários com dispositivos escravos “burros”
- **“desvantagens / preocupações”:**
 - sobrecarga da seleção;
 - latência;
 - único ponto de falha (mestre).



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo ... 5.3.3 – Protocolos de Revezamento

- **“Passagem de Permissão”** .. permissão de controle é passada de um nó para o próximo em ordem sequencial.
- **“desvantagens / preocupações”**:
 - sobrecarga da permissão;
 - latência;
 - único ponto de falha (permissão).



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.3 - Protocolo de Acesso Múltiplo

... 5.3.3 – Protocolos de Revezamento

- **“particionamento do canal”** .. por tempo, por frequência ou por código (Time Division; Frequency Division; CDMA).
- **“acesso aleatório”** .. ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
- percepção de colisão é fácil em redes cabeadas e difícil em “wireless”;
- CSMA/CD usado na Ethernet; CSMA/CA usado na 802.11.
- **“revezamento”** .. “polling” do “site” central ou passagem de permissão
- Bluetooth, FDDI, IBM Token Ring

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace

5.4 – Endereçamento na Camada de Enlace

- “**como encontrar os “hosts” ou roteadores !?”** .. ambos têm endereços de camada de enlace e de camada de rede.
- ... necessidade advém do fato de que é imprescindível localizar a entidade para que se possa encaminhar a informação.
- “**observação**” .. são as interfaces de rede que tem endereços de enlace e não os “hosts” ou comutadores de rede e de enlace.
- ... ou seja, há um endereço de camada de enlace para cada **NIC (Network Interface Card)** ou Interface de Rede.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace

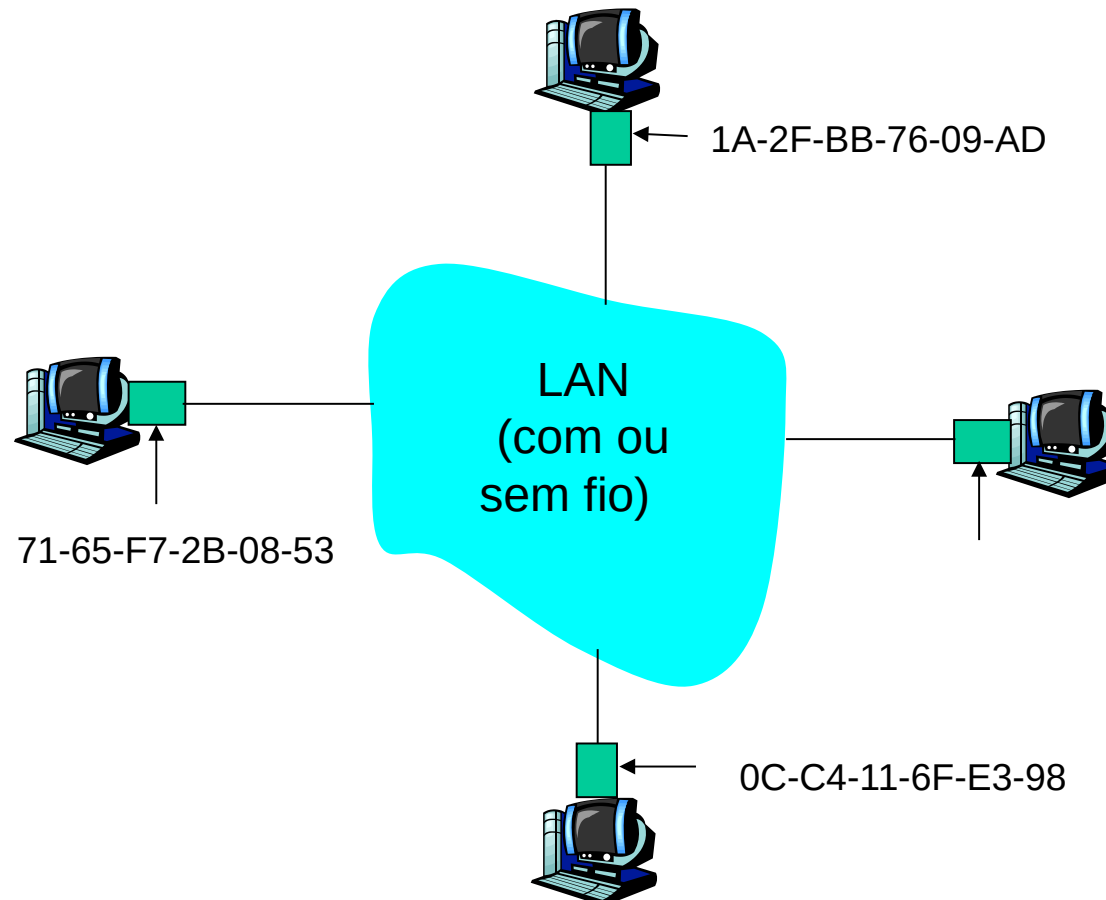
5.4.1 – Endereço MAC

- “**endereço na camada de enlace**” .. também referenciado como “endereço de rede local” ou “endereço físico” ou “endereço MAC”.
- ... tem por função levar o quadro de uma interface de rede para outra interface que está conectada fisicamente na mesma sub-rede.
- ... endereço MAC contém 48 bits para a maioria das redes locais e está armazenado na memória ROM da interface de rede, não obstante e, as vezes, pode ser configurado por software.
- ... já o endereço IPv4 de 32 bits é o endereço da “**camada de rede**” usado para determinar o caminho do datagrama até o destino.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace

... 5.4.1 – Endereço MAC

- e.g., cada adaptador de rede local tem um endereço exclusivo, ou seja, não se repete em nenhuma outra interface de rede.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace

... 5.4.1 – Endereço MAC

- IEEE administra a alocação de endereços MAC .. fabricantes de NICs compram parcela do espaço de endereços MAC.
- ... fixa os primeiros 24 bits de um endereço MAC e, assim, permite que a empresa crie combinações exclusivas com os últimos 24 bits.
- Endereço MAC tem “**estrutura linear**” (endereço plano) >>
- .. uma interface de rede pode ser retirada de um “host” e instalada em um outro “host” de uma outra sub-rede, já o endereço IP é hierárquico.
- .. cada adaptador que recebe um quadro, verifica se o endereço MAC de destino combina com o endereço MAC do adaptador.
- .. se combinarem, o adaptador extrai o datagrama do quadro e o repassa para a camada de rede da pilha de protocolos.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace

... 5.4.1 – Endereço MAC

- “**broadcast**” .. as vezes um adaptador remetente quer que todos os outros adaptadores na rede local recebam e processem o quadro que ele está prestes a enviar – endereço especial.
- ... endereço de “broadcast” é uma cadeia de 48 bits de “1s” consecutivos, isto é, FF:FF:FF:FF:FF:FF₁₆
- “**multicast address**” .. identificador lógico para um grupo de “hosts” em uma rede local, que estão disponíveis para processar pacotes ou quadros cujo destino é um serviço de rede designado.
- ... podem ser usados na camada de enlace, p.ex., ethernet.
- ... podem ser usados na camada de rede, p.ex., multicast (IPv4/IPv6)

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace

... 5.4.1 – Endereço MAC

- e.g., quadros ethernet com o valor “1” no bit menos significativo do 1º octeto do endereço destino são tratados como quadros “multicast” e são encaminhados para todos os pontos da rede.
- 01:00:0C:CC:CC:CC - CDP (Cisco Discovery Protocol)
- 01:00:0C:CC:CC:CC - VTP (VLAN Trunking Protocol)
- 01:00:0C:CC:CC:CD - Cisco Shared Spanning Tree Protocol Address
- 01:80:C2:00:00:00 - Spanning Tree Protocol (for bridges) IEEE 802.1D
- 01:80:C2:00:00:[00;03;0E] - Link Layer Discovery Protocol
- 01:80:C2:00:00:01 - Ethernet flow control (Pause frame) IEEE 802.3x
- 01:00:5E:xx:xx:xx - IPv4 Multicast (RFC 1112)
- 33:33:xx:xx:xx:xx - IPv6 Multicast (RFC 2464)

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace

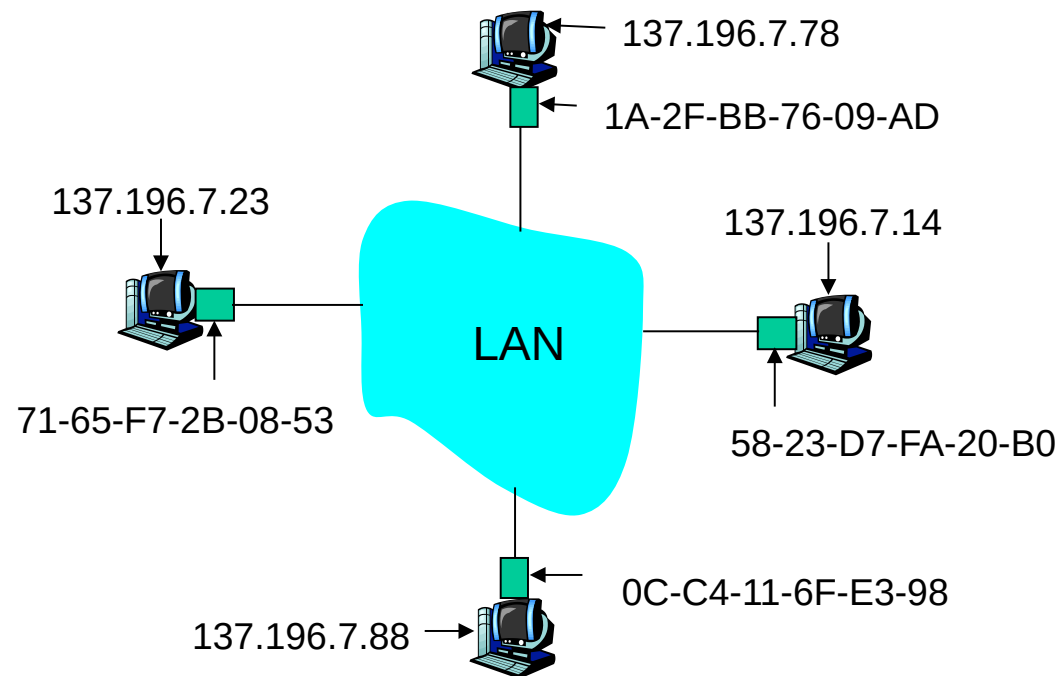
5.4.2 – Address Resolution Protocol (ARP)

- e.g., considere o envio pelo “Host A” de um pacote (Camada 3) ao “Host B”, no entanto, “A” conhece apenas o endereço IP de “B”.
- .. então como determinar o endereço MAC de “B” conhecendo-se o endereço IP (Camada de Rede) de “B” ??
- ... cada “host” ou roteador na rede local tem uma tabela ARP (Address Resolution Protocol), ou seja, tabela na qual se mapeia o endereço IP, ao correspondente MAC e o TTL para alguns nós da rede local.
- ... ou seja, 3-túplas <IP Address - MAC Address - TTL>
- ... onde TTL (Time To Live) é o tempo após o qual o mapeamento do respectivo endereço é esquecido, normalmente 20 minutos.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace

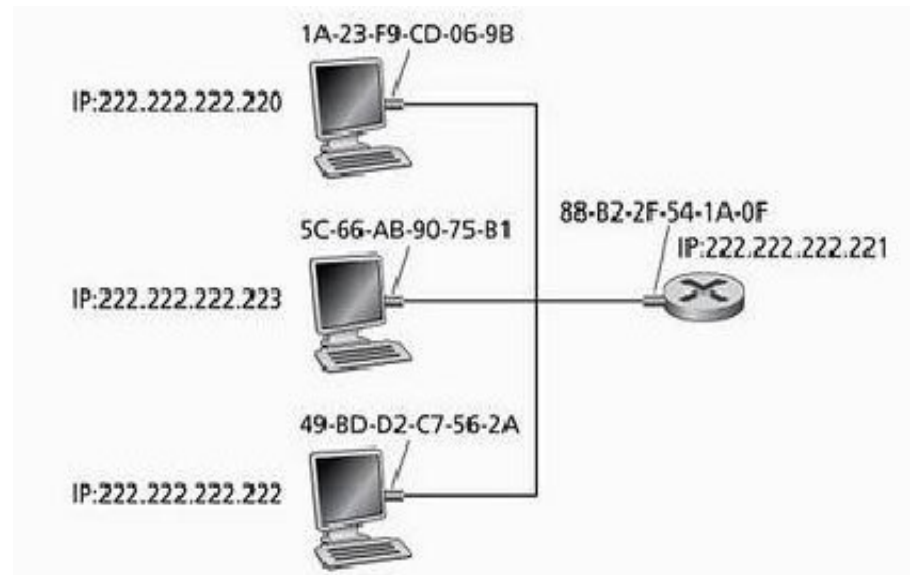
... 5.4.2 – Address Resolution Protocol (ARP)

- ... cada “host” ou roteador na rede local tem uma tabela ARP (Address Resolution Protocol), ou seja, tabela na qual se mapeia “**IP Address** - **MAC Address** - **TTL**” para alguns nós da rede local.



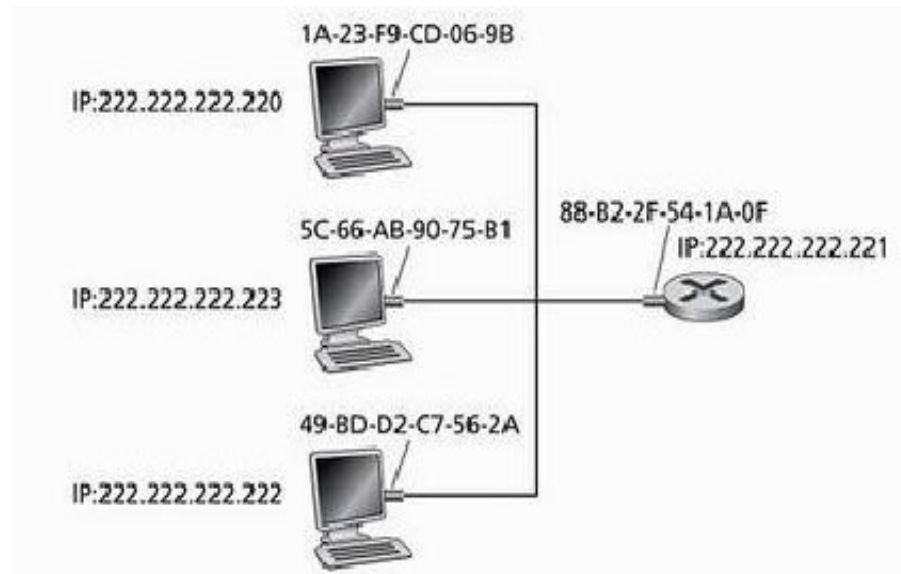
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace ... 5.4.2 – Address Resolution Protocol (ARP)

- “**problema**” .. “A” quer enviar datagrama a “B”, mas endereço MAC de “B” não está na tabela ARP de “A”.
- ... “A” envia por “broadcast” 01 (um) pacote de consulta ARP, contendo endereço IP de “B” e endereço MAC de destino FF:FF:FF:FF:FF:FF (endereço de “**broadcast no enlace**”).
- ... todas as máquinas na rede local recebem consulta ARP, mas apenas a máquina que tem o IP de “B” (Host B) irá responder.



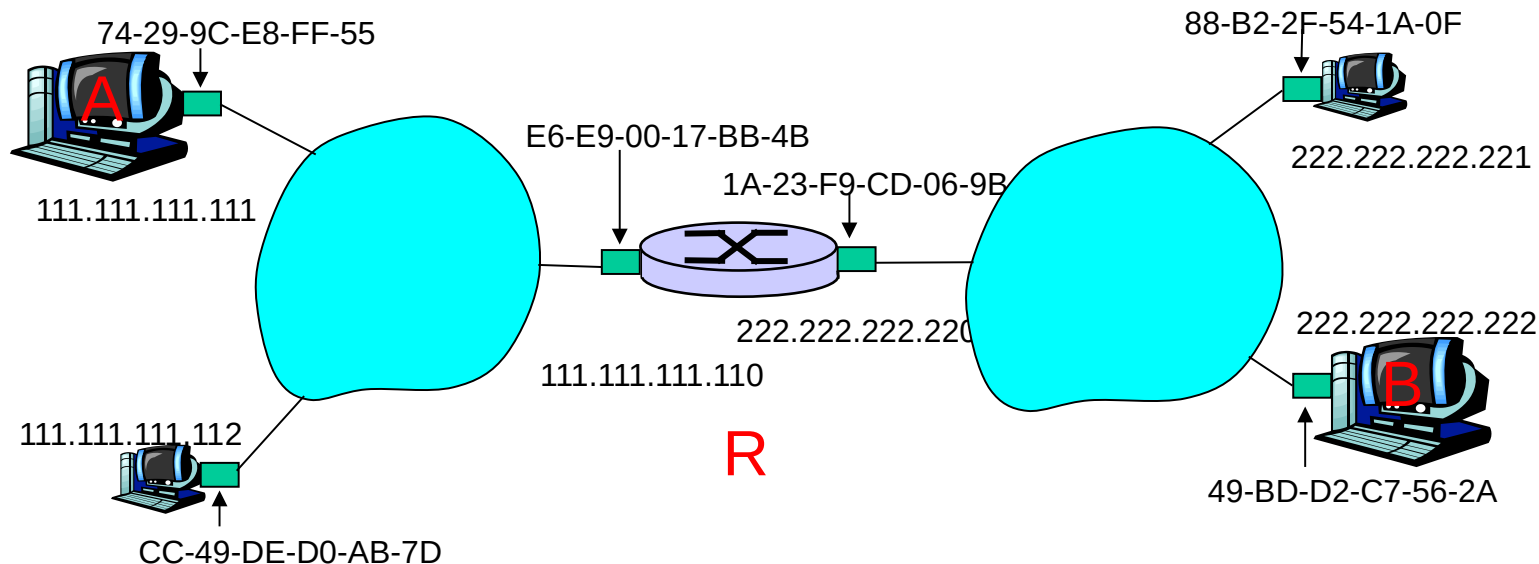
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace ... 5.4.2 – Address Resolution Protocol (ARP)

- **“Address Resolution Protocol” (ARP)** .. é “Plug and Play”, ou seja, nós criamos suas tabelas sem intervenção do administrador de rede.
- ... “B” recebe pacote ARP, responde para “A” com seu endereço MAC, ou seja, MAC de “B” .. neste caso quadro enviado ao endereço MAC de “A” passa a ser comunicação “unicast” e não “multicast”.
- ... “A” salva em cache o par de endereços IP-para-MAC em sua tabela ARP até a informação expirar ou ser renovada.



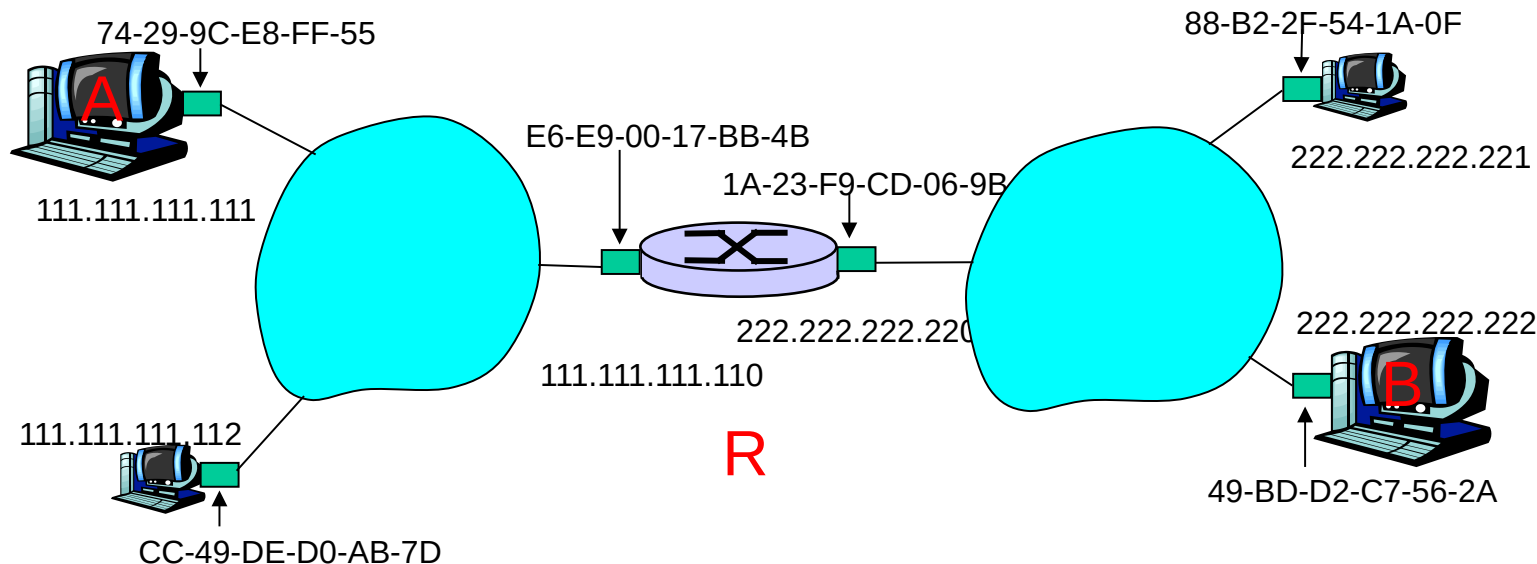
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace ... 5.4.2 – Address Resolution Protocol (ARP)

- “roteando datagrama para uma outra sub-rede” .. “premissa” = “A” conhece endereço IP de “B”, mas não conhece endereço MAC de B.
- .. 02 tabelas ARPs no Roteador “R”, uma para cada Sub-Rede IP.



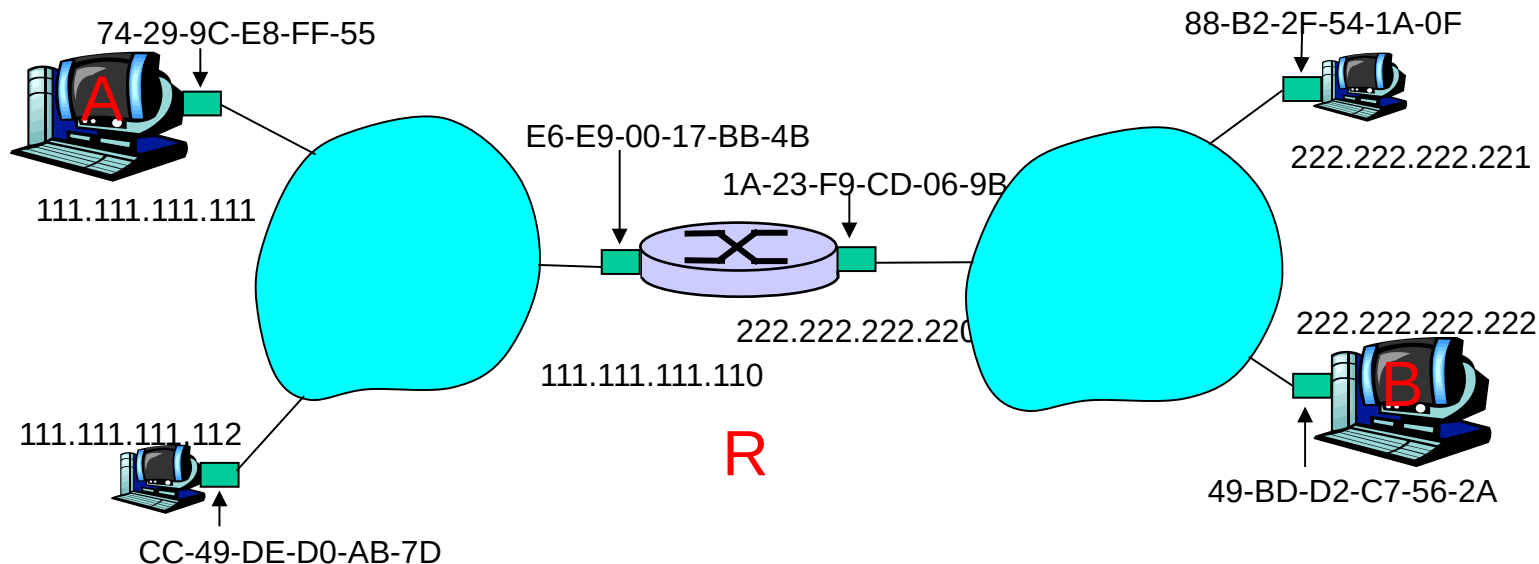
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace ... 5.4.2 – Address Resolution Protocol (ARP)

- (1) “A” cria datagrama IP com origem “A” e destino “B”, ou seja, datagrama com os endereços IP de “A” (fonte) e IP de “B” (destino).
- (2) “A” usa ARP para obter endereço MAC de “R” .. E6:E9:00:17:BB:48 pois sabe que o IP de “B” não está na mesma sub-rede.



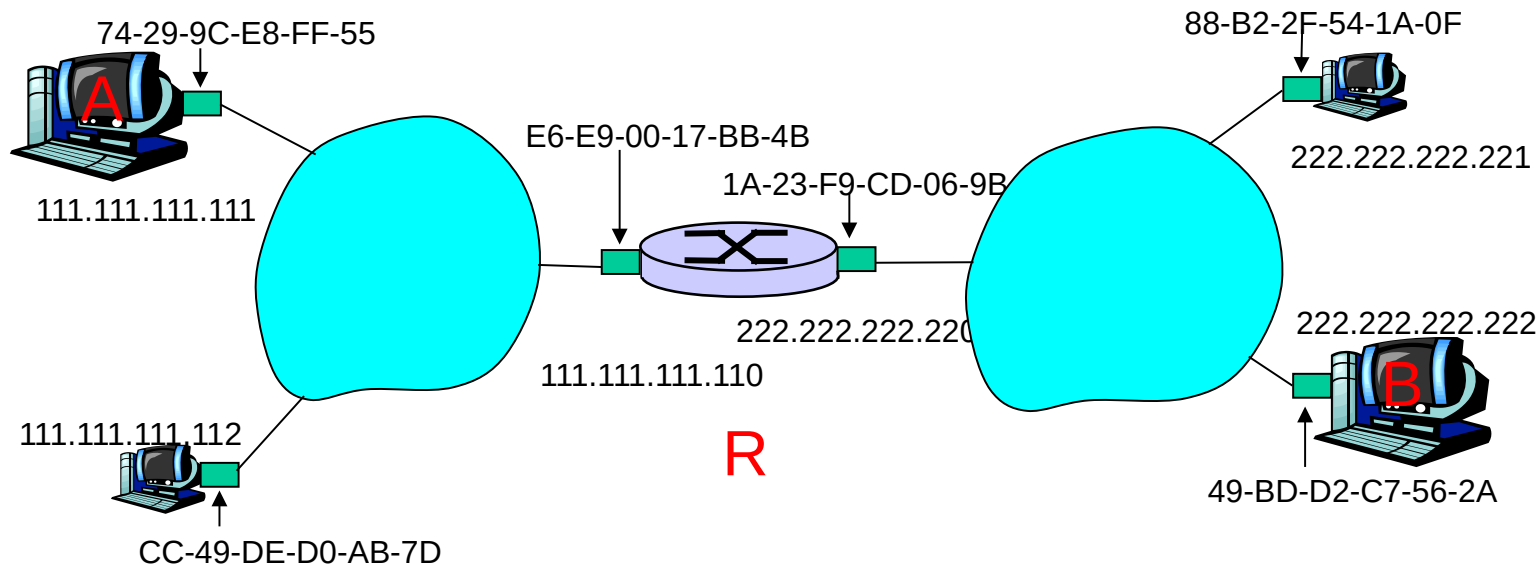
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace ... 5.4.2 – Address Resolution Protocol (ARP)

- (3) “A” monta quadro na camada de enlace com MAC de “R” como destino que por sua vez contém datagrama de “A” para “B” e Interface NIC de “A” envia quadro na sub-rede (destino MAC é “R”).
- (4) Interface NIC de R” recebe quadro e remove o datagrama IP de quadro Ethernet cujo destino é “B”.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.4 - Endereço na Camada de Enlace ... 5.4.2 – Address Resolution Protocol (ARP)

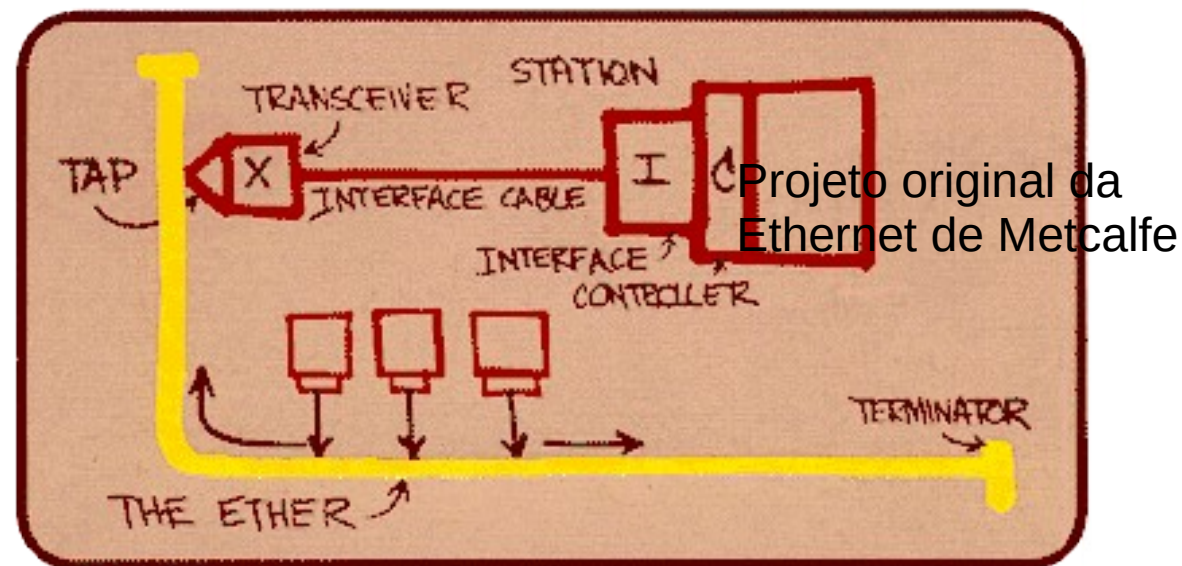
- (5) Roteador “R” usa ARP para endereço MAC de “B” tendo por base IP “B”, pois sabe que o endereço IP pertence a outra sub-rede.
- (6) Roteador “R” cria quadro contendo datagrama IP “A” para “B” e envia a “B” com MAC de “broadcast”.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

5.5 – Protocolo 802.3 - Ethernet

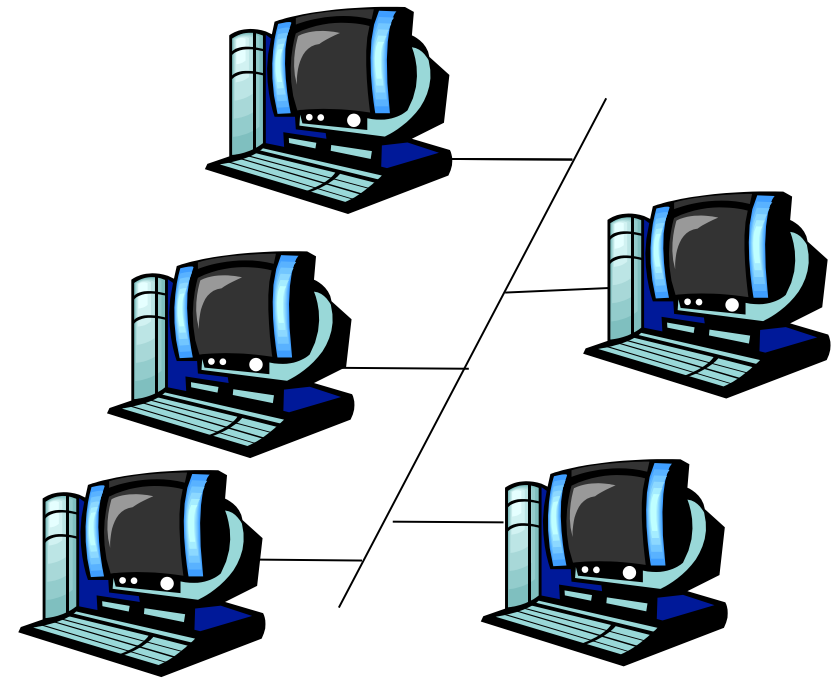
- Tecnologia de LAN com fio (cabeado) é “dominante”:
- .. por ser barata, p.ex, US\$ 20 para NIC.
- .. primeira tecnologia de LAN utilizada em larga escala.
- .. mais simples e mais barata que as LANs de permissão e ATM.
- .. acompanha a corrida da velocidade >> 10 Mbps .. 10 Gbps.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5 – Protocolo 802.3 - Ethernet

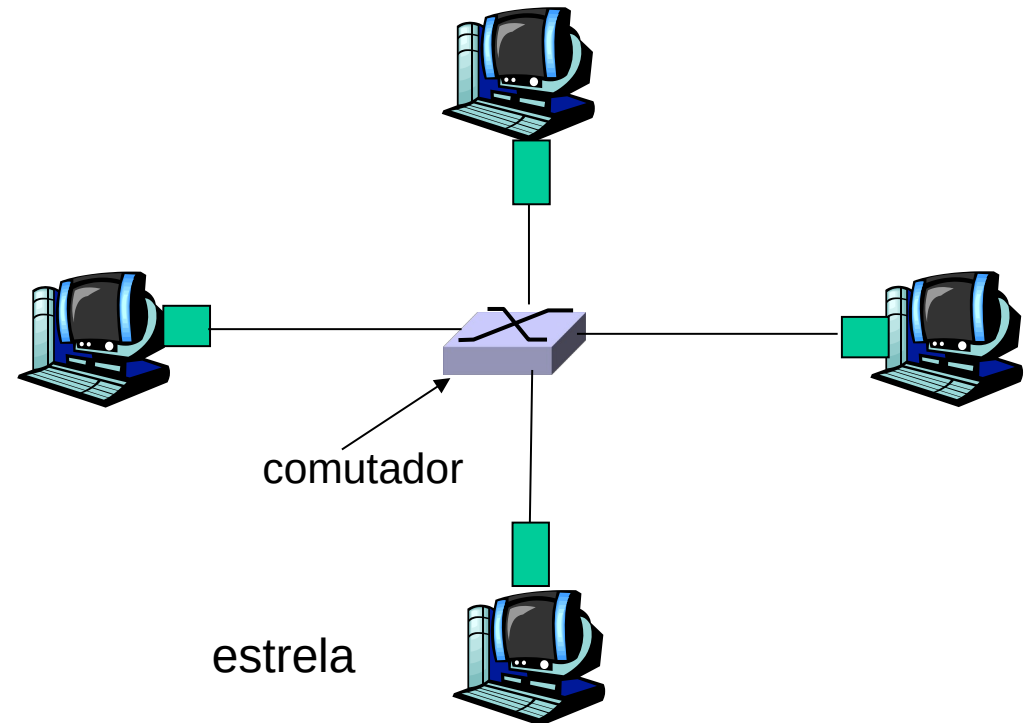
- “**topologia de barramento**” .. popular até meados dos anos 90.
- .. todos os nós no mesmo domínio, ou seja, transmissões em curso podem colidir umas com as outras pois estão no mesmo domínio.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5 – Protocolo 802.3 - Ethernet

- “**topologia de estrela**” .. topologia que prevalece nos dias atuais é a de comutador de quadros ativo no centro da rede local.
- .. cada interface de rede executa o protocolo Ethernet (em separado), ou seja, nós não colidem uns com os outros em razão da contenção.
- .. cada enlace representa um domínio de colisão (contenção) suportado pelo comutador de camada de enlace.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

5.5.1 – Estrutura do Quadro Ethernet

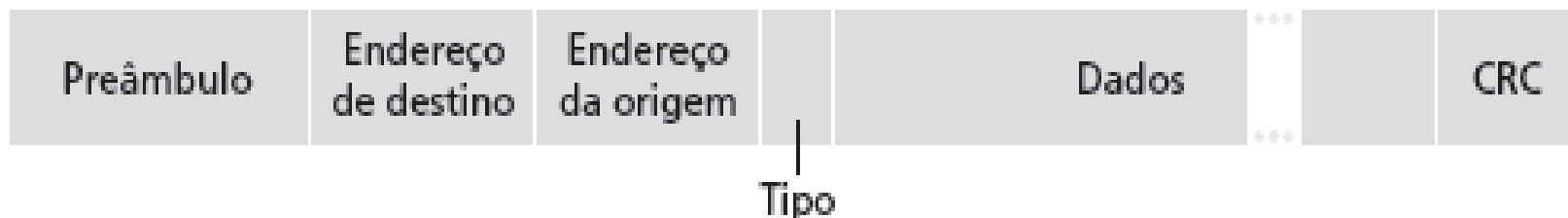
- NIC do remetente encapsula datagrama IP (ou outro pacote de protocolo da camada de rede) no quadro Ethernet.
- “**preâmbulo**” .. 7 bytes com padrão “10101010” seguido por um byte com padrão “10101011” que possibilitam a sincronização das taxas de clock do receptor e do emissor.
- “**endereços de origem e de destino**” .. 6 bytes que correspondem aos respectivos endereços MAC de origem e de destino.
- .. se adaptador de rede recebe quadro com endereço de destino igual ao seu endereço MAC ou endereço de broadcast (p.ex., pacote ARP), o quadro sobe a pilha de comunicação (posto para dentro).



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5.1 – Estrutura do Quadro Ethernet

- “**endereços de origem e de destino**” .. 6 bytes que correspondem aos respectivos endereços MAC origem e destino.
- .. no receptor, camada de enlace repassa dados do quadro à camada de rede, caso contrário (erro), adaptador de rede descarta quadro.
- “**tipo**” .. indica protocolo da camada mais alta (normalmente Protocolo IP, mas outros são possíveis, p.ex., Novell IPX, AppleTalk).
- **CRC (Cyclic Redundant Code)** .. recalculado no receptor para detectar ausência ou presença de erro (quadro é descartado).



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5.1 – Estrutura do Quadro Ethernet

- Protocolo 802.3 ou Protocolo Ethernet:
- **“não orientado a conexão”** .. não há estabelecimento de conexão entre as interfaces NICs de origem e destino;
- **“não confiável”** .. NIC de destino NÃO envia quadros de “ACK” ou “NoACK” à interface NIC de origem (não há confirmação).
- ... fluxo de datagramas passados à camada de rede pode ter lacunas (datagramas não entregues) em função de quadros não entregues.
- ... lacunas serão preenchidas se aplicação utilizar protocolos confiáveis nas camadas superiores, p.ex., TCP na Arq. TCP/IP.
- **“Protocolo MAC da Ethernet”** .. CSMA/CD não “slotted”.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5.1 – Estrutura do Quadro Ethernet

- e.g., alguns passos do protocolo ethernet.
- 1) NIC recebe datagrama da camada de rede e cria quadro com os respectivos enderecos MAC de origem e de destino.
- 2) .. se NIC sentir canal ocioso, inicia transmissão do quadro, mas se o canal estiver ocupado, espera até estar ocioso, depois transmite.
- 3) .. se NIC transmitir quadro inteiro sem detectar outra transmissão, NIC finaliza a transmissão do quadro !!
-

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5.1 – Estrutura do Quadro Ethernet

- e.g., alguns passos do protocolo ethernet.
- ...
- 3) .. se NIC transmitir quadro inteiro sem detectar outra transmissão, NIC finaliza a transmissão do quadro !!
- 4) .. se NIC detectar outra transmissão enquanto transmite, aborta e en- via sinal de congestionamento (reforço de congestionamento).
- 5) .. depois de abortar, NIC entra em “backoff” exponencial, ou seja, após “m” colisões, NIC escolhe K aleatoriamente dentre $\{0,1,2,\dots, 2^m - 1\}$ >> NIC espera “K” * 512 tempos de bit e retorna à Etapa 2.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

5.5.2 – Protocolo de Acesso Múltiplo CSMA/CD

- **“sinal de congestionamento”** .. sinal que permite aos demais transmissores perceberem uma colisão.
- **“tempo de bit”** .. 0,1 μ s para Ethernet de 10 Mbps, ou seja, $1 / 10 \times 10^6$, já para $K = 1023$, tempo de espera é de cerca de 50 ms.
- **“backoff exponencial”** .. adaptar tentativas de retransmissão à carga estimada, assim, se carga é pesada, a espera aleatória será maior.
- ... 1ª colisão .. escolha “K” dentre {0,1}, assim, o atraso é $K \times 512$ tempos de transmissão de bit, ou “K” * 0,1 μ s.
- ... 2ª colisão .. escolha K dentre {0,1,2,3}, assim, o atraso é $K \times 512$ tempos de transmissão de bit, ou “K” * 0,1 μ s.
- ... após dez colisões, escolha K dentre {0,1,2,3,4,...,1023}, ou seja, após “x” colisões escolha “K” dentre {0, 1, 2, 3, ..., $2^x - 1$ }

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

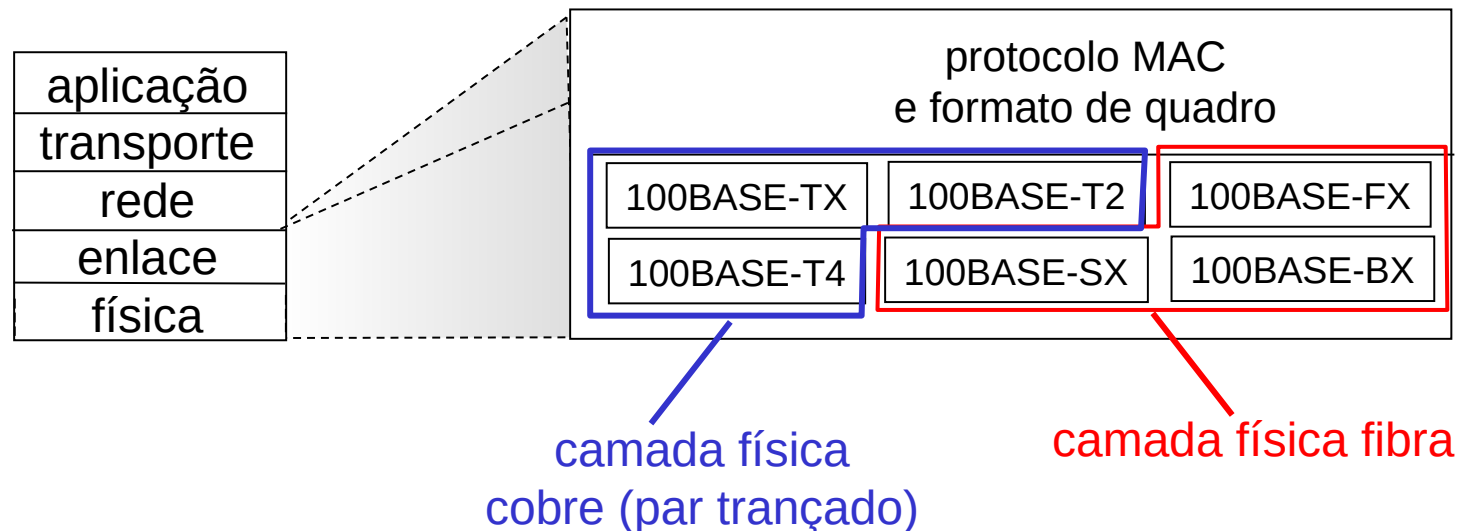
... 5.5.2 – Protocolo de Acesso Múltiplo CSMA/CD

- “**eficiência**” do CSMA/CD tendo por base o T_{PROP} e T_{TRANS} ...
- T_{PROP} = atraso máx. propagação entre 2 nós na rede local
- T_{TRANS} = tempo para transmitir quadro de tamanho máximo.
- Eficiência = $1 / (1 + 5 * T_{prop} / T_{trans})$, ou seja, “**eficiência**” vai para 1 quando $t_{prop} \gg 0$ ou $t_{trans} \gg \text{infinito}$.
- “**CSMA/CD**” tem **melhor desempenho** que ALOHA e “Slotted” ALOHA e, além disso, é um protocolo simples, barato, descentralizado!

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5.2 – Protocolo de Acesso Múltiplo CSMA/CD

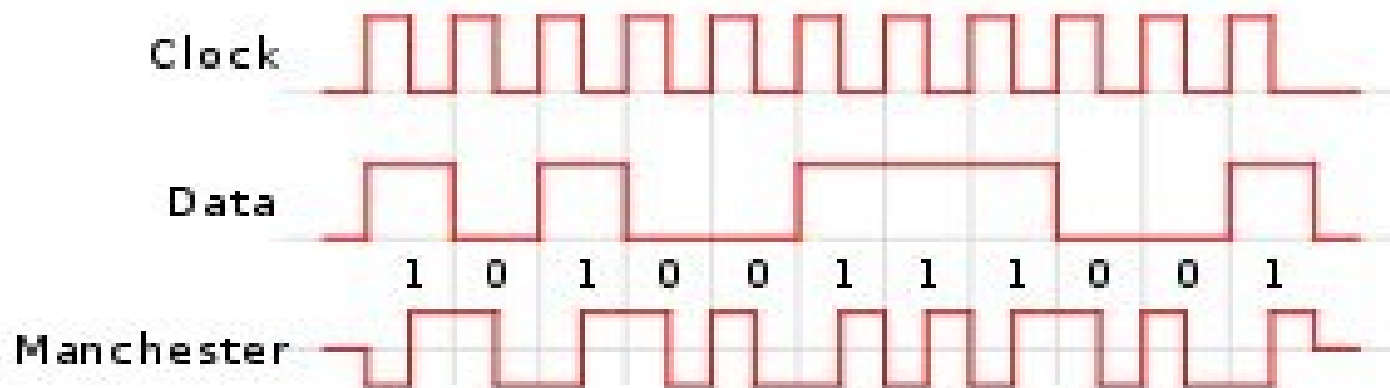
- Muitos Padrões Ethernet:
- Protocolo MAC e formato de quadros são comuns.
- diferentes velocidades, p.ex., 2 Mbps, 10/100/1000 Mbps e 10 Gbps.
- diferentes meios físicos, p.ex., cabo coaxial; par trançado; fibra.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5.2 – Protocolo de Acesso Múltiplo CSMA/CD

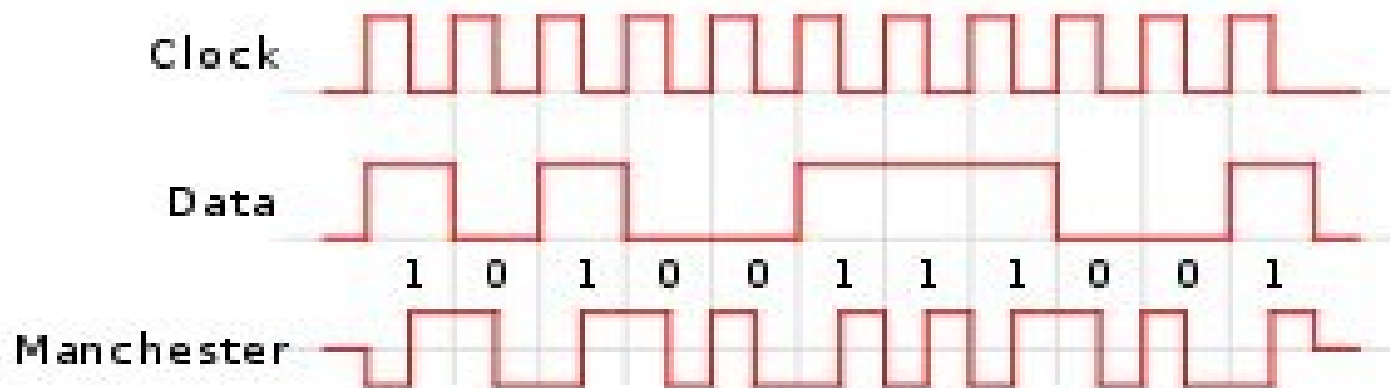
- **“Codificação Manchester”** - usada no Padrão 10BaseT:
- [Computer Networks – Andrew Tanenbaum - 4th] - ... bit “1” representado por nível baixo de tensão e o “0” por nível alto de tensão.
- ... tem por principal vantagem a facilidade de se recuperar de erros, mesmo que parte da transmissão se perca.
- [Wikipedia] ... permite saber qual é o sinal enviado simplesmente acompanhando uma transição, mesmo que parte do sinal se perca.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5.2 – Protocolo de Acesso Múltiplo CSMA/CD

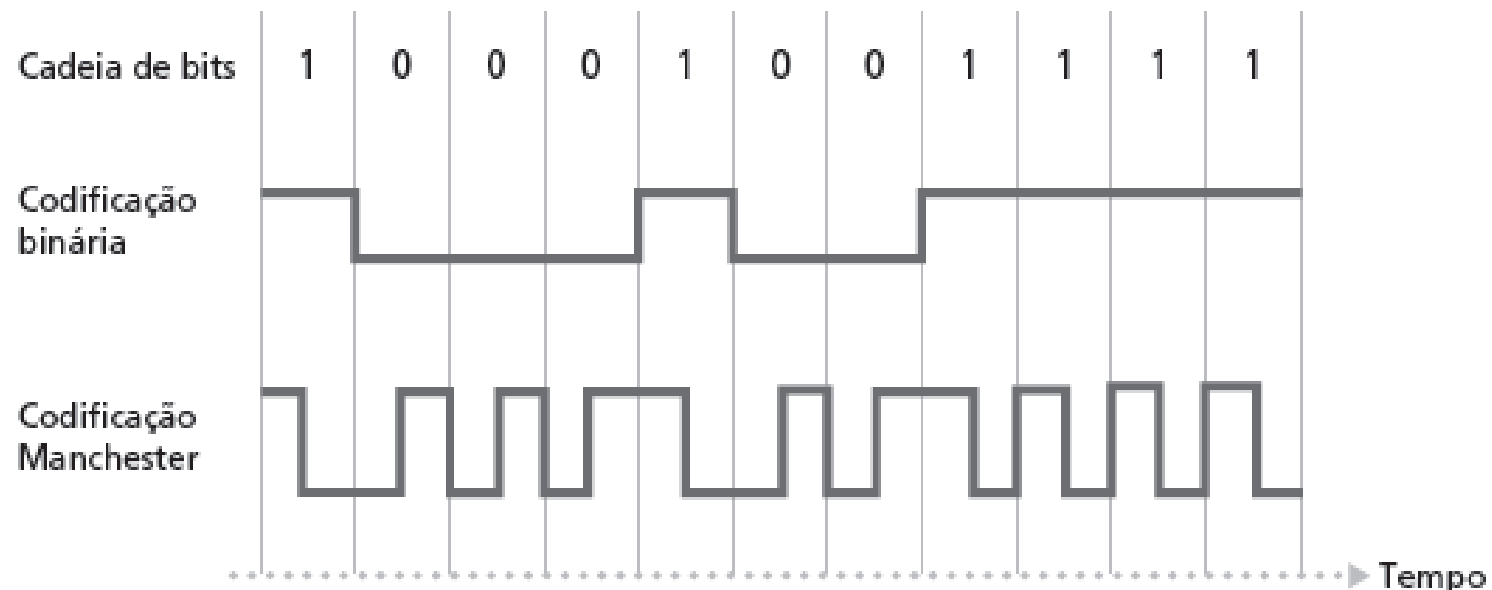
- **“Codificação de Manchester Diferencial”**
- ... codificação um pouco mais complexa, exige que se saiba o estado do sinal anterior para encaminhar o próximo sinal.
- [Wikipedia] ... "1" é representado fazendo a primeira metade do sinal igual à última metade do sinal anterior.
- [Wikipedia] ... "0" é representado fazendo a primeira metade do sinal ser diferente da segunda metade do sinal anterior.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.5 - Protocolo 802.3 - Ethernet

... 5.5.2 – Protocolo de Acesso Múltiplo CSMA/CD

- **“Codificação Manchester”** - usada no Padrão 10BaseT:
- .. cada bit tem uma transição no meio do intervalo do bit e que permite que “clocks” no emissor e receptor estejam sincronizados.
- .. tem como vantagem a não necessidade de “clock” centralizado ou global entre os nós (Livro Texto – não definição da Cod. Manchester).



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

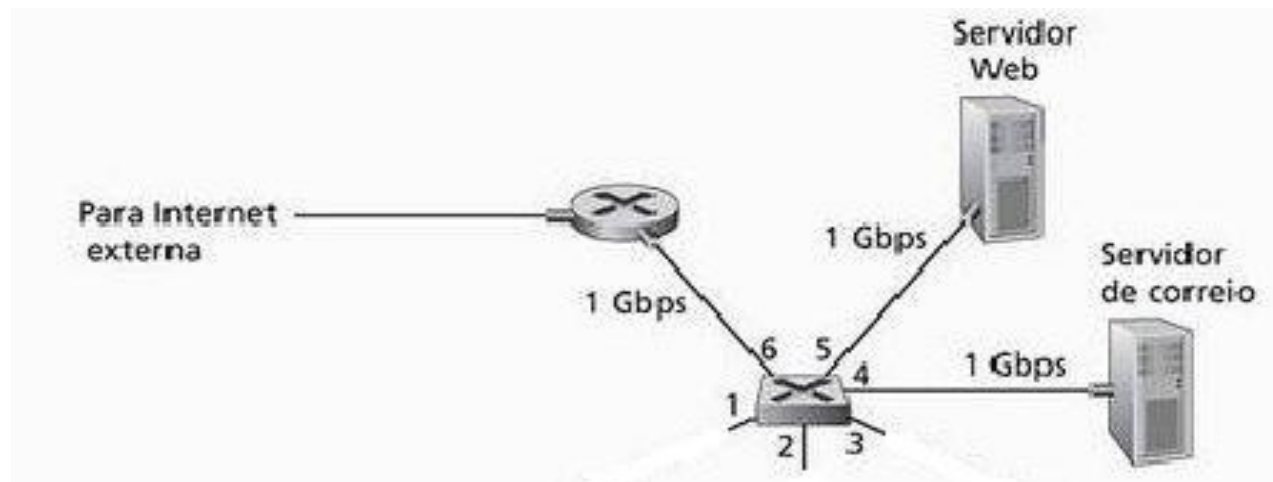
5.6 – Comutadores de Camada de Enlace

- “**comutador de camada de enlace**” .. utiliza topologia em estrela, ou seja, cada nó está conectado ao comutador (elemento central).
- “**função**” - recebe quadros por enlaces de entrada e encaminha-os para enlaces de saída de forma transparente aos nós.
- ... velocidade com que quadros chegam a qualquer interface de saída do comutador pode temporariamente exceder a capacidade do enlace da interface >> necessidade de “bufferização” dos quadros.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

5.6.1 – Repasse e Filtragem

- **“filtragem”** .. capacidade do comutador quanto ao repasse ou não (descarte) de um quadro para alguma outra interface.
- **“repasse”** .. capacidade do comutador que determina as interfaces para as quais um quadro deve ser replicado.
- **“tabela de comutação”** .. contém registros para alguns nós da rede local, mas não necessariamente para todos.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.1 – Repasse e Filtragem

- comutador – repasse/filtragem de dados:
- // registra enlace associado ao host emissor
- // indexa tabela de comutação usando endereço MAC de destino
- if entrada encontrada para o destino
- then {
- if dest no segmento do qual o quadro chegou
- then remove o quadro
- else repassa o quadro na interface indicada
- }
- else inunda



repassa para todas as interfaces, exceto a interface através da qual o quadro foi entregue ao switch.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.1 – Repasse e Filtragem

- “**tabela de comutação**” - contém registros para alguns nós da rede local, mas não necessariamente para todos.
- .. endereço MAC dos nós que estão conectados.
- .. nro. das interfaces do comutador que leva aos nós.
- .. horário em que o registro foi inserido na tabela de comutação.
- Obs.: tabela de comutação de camada de enlace encaminha quadros baseados em endereços MAC em vez de endereços IPs.

Endereço	Interface	Horário
62-FE-F7-11-89-A3	1	9h32
7C-BA-B2-B4-91-10	3	9h36
...

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

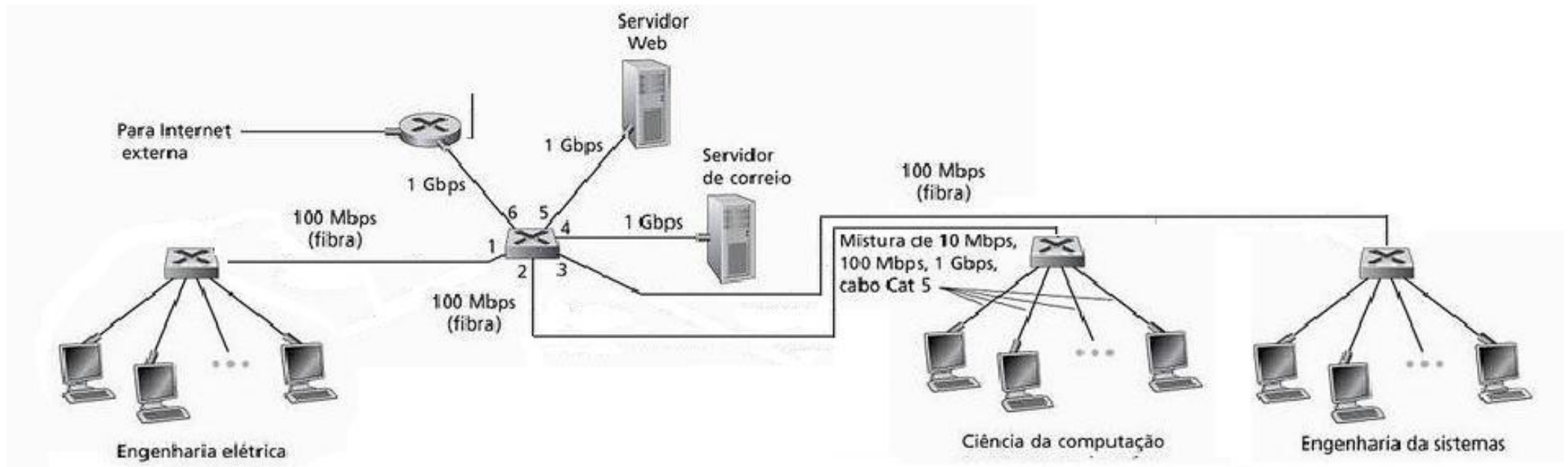
... 5.6.1 – Repasse e Filtragem

- e.g., considere um quadro que chegue a um computador na interface “X” com endereço de destino DD:DD:DD:DD:DD:DD.
- Como o comutador indexa este endereço na tabela !?
- .. se não existir entrada na tabela de comutação, o comutador encaminha cópias do quadro para os “buffers” de saída de todas as interfaces, exceto a interface “X” >> **“broadcast”**.
- .. se existir uma entrada ligando o endereço DD:DD:DD:DD:DD:DD à interface “X”, o comutador realizará apenas a função de “filtragem”.
- .. se existir uma entrada ligando o endereço DD:DD:DD:DD:DD:DD a uma interface “Y” diferente de “X”, o quadro será encaminhado pelo enlace da rede local associado a interface “Y”.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.1 – Repasse e Filtragem

- e.g., considere um quadro com endereço destino 62:FE:F7:11:89:A3 chegando ao comutador e que foi recebido pela interface “1”.
- ... comutador ao buscar a informação na tabela identifica que o destino está no segmento da rede local conectado a interface “1”.
- “**pergunta**” .. o que o comutador deve fazer ?!



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

5.6.2 – Aprendizagem Automática


- “**comutador**” .. capaz de montar a tabela de comutação de forma automática e dinâmica, sem intervenção de um adm. de rede.
- ... para cada quadro recebido em uma interface tendo por base uma tabela vazia, o comutador armazena: (1) endereço MAC origem do quadro; (2) interface da qual veio o quadro; e (3) horário corrente.
- ... comutador apaga de tempo em tempo entradas na tabela das quais não recebeu quadros cujos endereços fontes contém os endereços MAC referentes aquelas entradas da tabela de comutação.
- “**comutadores**” são dispositivos do tipo “plug-and-play” .. ao se instalar um comutador de camada de enlace é necessário apenas conectar os enlaces da rede local às suas interfaces.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.2 – Aprendizagem Automática

- e.g., considere um quadro com endereço fonte 01:12:23:34:45:56 que chega ao comutador pela interface “2” às 9h39.
- ... suponha que este endereço não está na tabela de comutação, então o comutador insere este registro na tabela.

Endereço	Interface	Horário
62-FE-F7-11-89-A3	1	9h32
7C-BA-B2-B4-91-10	3	9h36



Endereço	Interface	Horário
01-12-23-34-45-56	2	9h39
62-FE-F7-11-89-A3	1	9h32
7C-BA-B2-B4-91-10	3	9h36
....

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.2 – Aprendizagem Automática

- e.g., considere que **nenhum** quadro com endereço fonte 62:FE:F7:11:89:A3 chegue ao computador entre 9h32 e 10h32 e, adicionalmente, considere que o tempo de envelhecimento seja de 60 min.
- ... comutador remove este endereço da sua tabela de comutação.

Endereço	Interface	Horário
01-12-23-34-45-56	2	9h39
62-FE-F7-11-89-A3	1	9h32
7C-BA-B2-B4-91-10	3	9h36
....

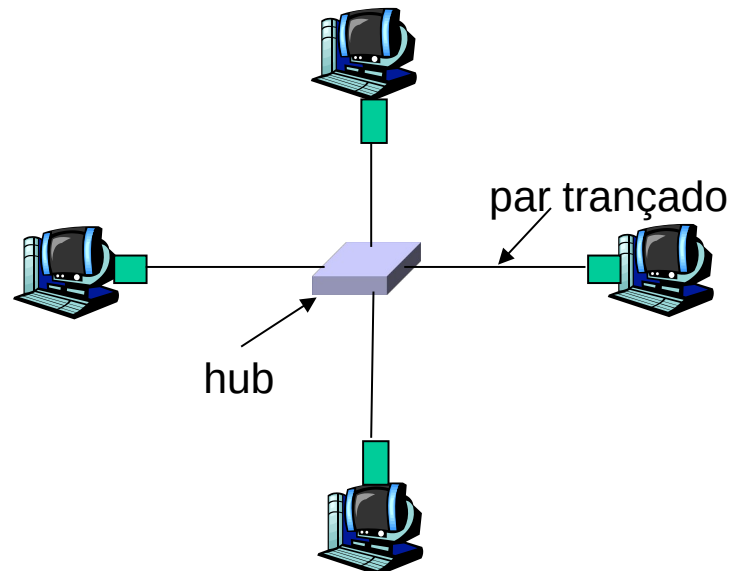


Endereço	Interface	Horário
01-12-23-34-45-56	2	9h39
7C-BA-B2-B4-91-10	3	9h36
....

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

5.6.3 – Propriedades do Comutador de Enlace

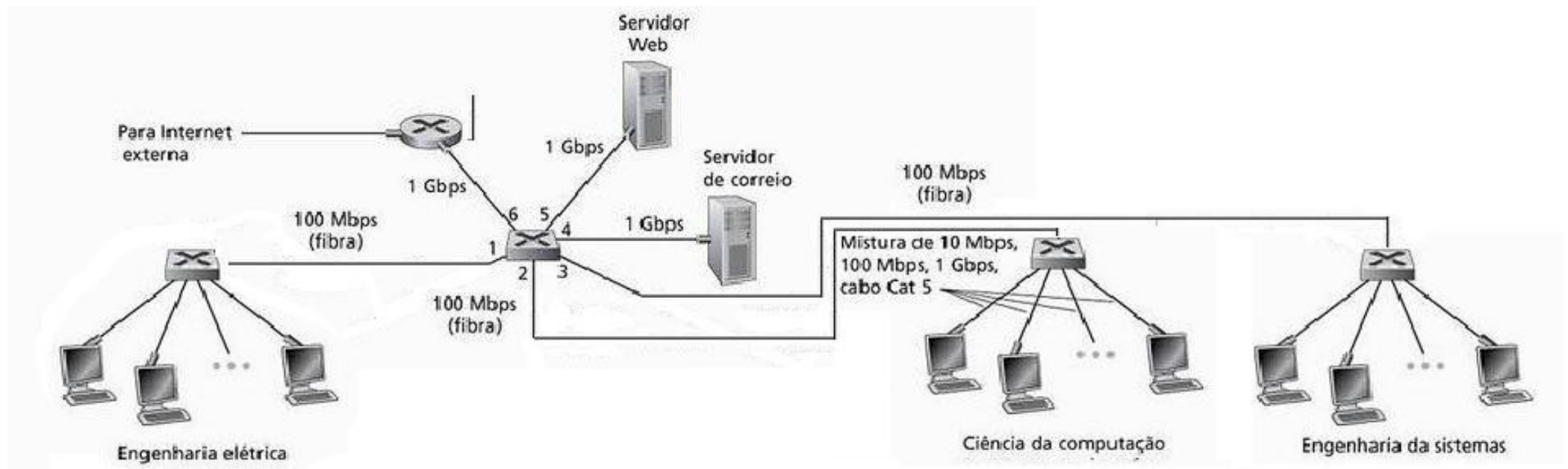
- **“comutador”/“switch” vs “hubs”** .. várias são as vantagens de se utilizar “switches” em vez de se usar enlaces “broadcast” ou “hubs” com topologia em estrela.
- **“eliminação de colisões”** .. comutadores armazenam quadros e não transmitem mais de um quadro em um enlace ao mesmo tempo, assim, não há desperdício devido as colisões.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.3 – Propriedades do Comutador de Enlace

- **“comutador”/“switch” vs “hubs”** .. várias são as vantagens de se utilizar “switches” em vez de se usar enlaces “broadcast” ou “hubs” com topologia em estrela.
- **“enlaces heterogêneos”** .. ao isolar os enlaces, os diferentes enlaces da rede local podem operar em diferentes velocidades bem como operar sobre diferentes tipos de meio, p.ex., par trançado, fibra ótica.



... 5.6.3 – Propriedades do Comutador de Enlace

- **“comutador”/“switch”** vs **“hubs”** .. várias são as vantagens de se utilizar “switches” em vez de se usar enlaces “broadcast” ou “hubs” com topologia em estrela.
- **“gerenciamento”** .. provê melhores características de segurança bem como simplifica a manutenção/gerenciamento da rede.
- e.g., considere um adaptador com falha que continuamente envia quadros “ethernet” (situação conhecida como “jabbering”).
- ... comutador pode detectar o problema e internamente desconectar o adaptador com defeito isolando a interface correspondente.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

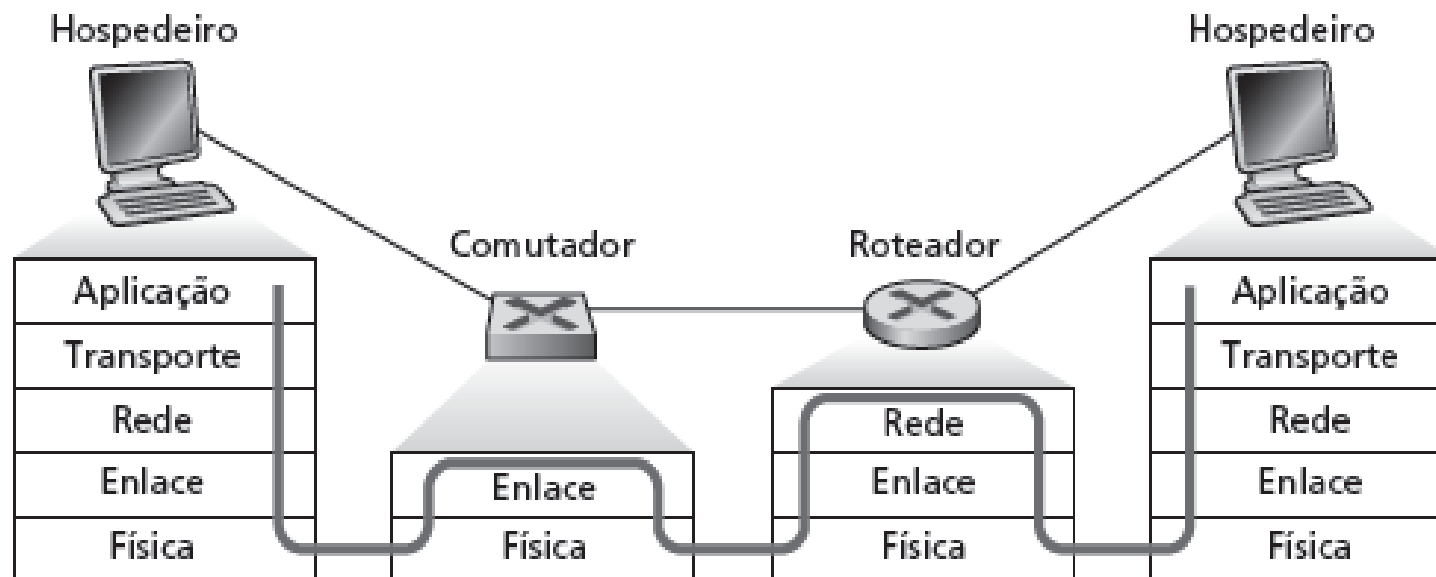
5.6.4 – Comutadores vs Roteadores

- **“switches”** .. comutador de camada de enlace do tipo “store and forward” que transmite quadros usando endereços MAC.
- **“roteador”** .. comutador de camada de rede do tipo “store and forward” que transmite pacotes usando endereço camada de rede.
- **Obs.:** ... mesmo sendo fundamentalmente diferentes, é comum administradores de rede terem que optar entre “switches” e “roteadores” como elementos de interconexão de redes.
- ... daí a importância de se conhecer os “prós” e “contras” de ambas abordagens, bem como as opções para interconexão de redes !!

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.4 – Comutadores vs Roteadores

- “**roteadores**” .. mantêm tabelas de roteamento e implementam algoritmos de roteamento de datagramas.
- “**switches**” .. mantêm tabelas de comutação, implementam filtragem e repasse de quadros, bem como algoritmos de aprendizagem.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.4 – Comutadores vs Roteadores

- “**análise**” - endereçamento na camada de rede é hierárquico e não linear como o endereçamento na camada de enlace, por isso, os pacotes normalmente não ficam circulando nos roteadores.
- ... circulam se as tabelas estiverem mal configuradas, ainda assim, um campo no cabeçalho limita o tempo de circulação do pacote.
- ... na camada de rede, pacotes não ficam restritos a topologia de “spanning tree” e podem usar o melhor trajeto entre fonte e destino.
- ... na camada de enlace, quadros estão restritos a topologia de “spanning tree”, logo, podem sofrer contenção nos enlaces.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.4 – Comutadores vs Roteadores

- “**roteadores**” - fornecem proteção de “firewall” contra as tempestades de “broadcast” de camada de enlace.
- ... no entanto, roteadores não são “plug and play” e, assim, necessitam da intervenção de um administrador de rede.
- ... roteadores apresentam tempo de processamento por pacote maior do que nos comutadores de camada de enlace uma vez que é implementada inteiramente em “software”.
- ... como já mencionado anteriormente, a camada de enlace é implementada na interface de rede, ou seja, é uma combinação de “hardware”, “software” e “firmware”.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.4 – Comutadores vs Roteadores

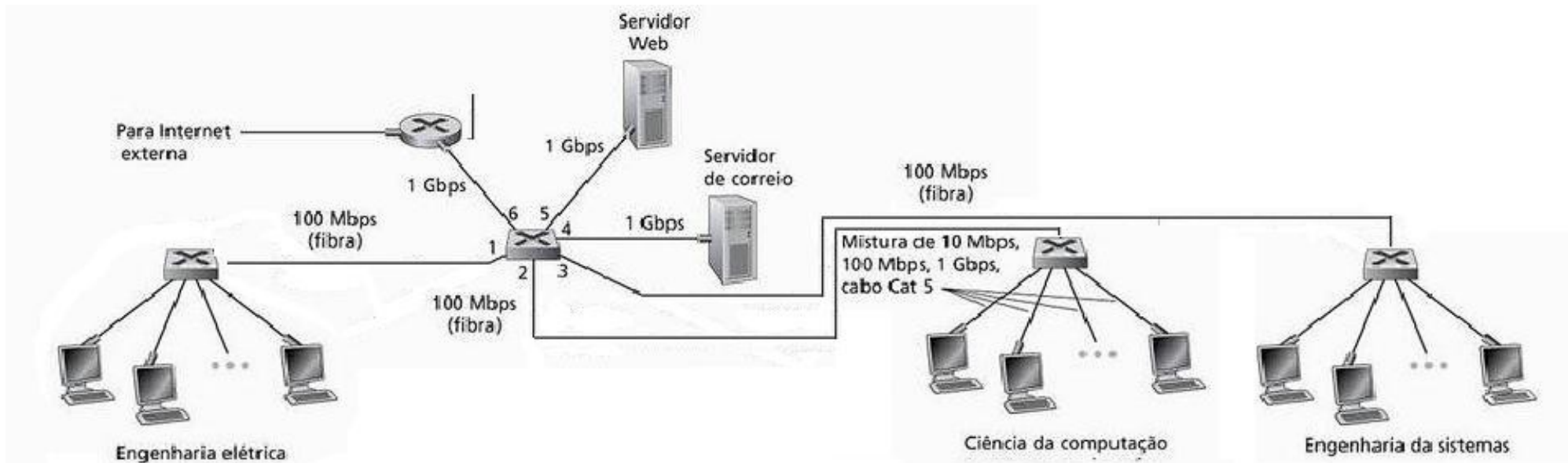
- Quando em um Rede Institucional deve-se usar roteadores e quando deve-se usar comutadores ?!
- ... em redes institucionais pequenas o uso de comutadores é satisfatório pois localizam o tráfego e aumentam a vazão agregada sem exigir configuração de endereço de rede.
- ... em redes institucionais com 1000s de “hosts” o uso do roteador é típico por fornecerem isolamento robusto do tráfego, controlam rajadas de “broadcast” e usam rotas mais inteligentes.

	Hubs	Roteadores	Comutadores
Isolamento de tráfego	não	sim	sim
Plug-and-play	sim	não	sim
Roteamento ótimo	não	sim	não

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Computadores de Enlace

5.6.5 – VLANs: Rede Local Virtual

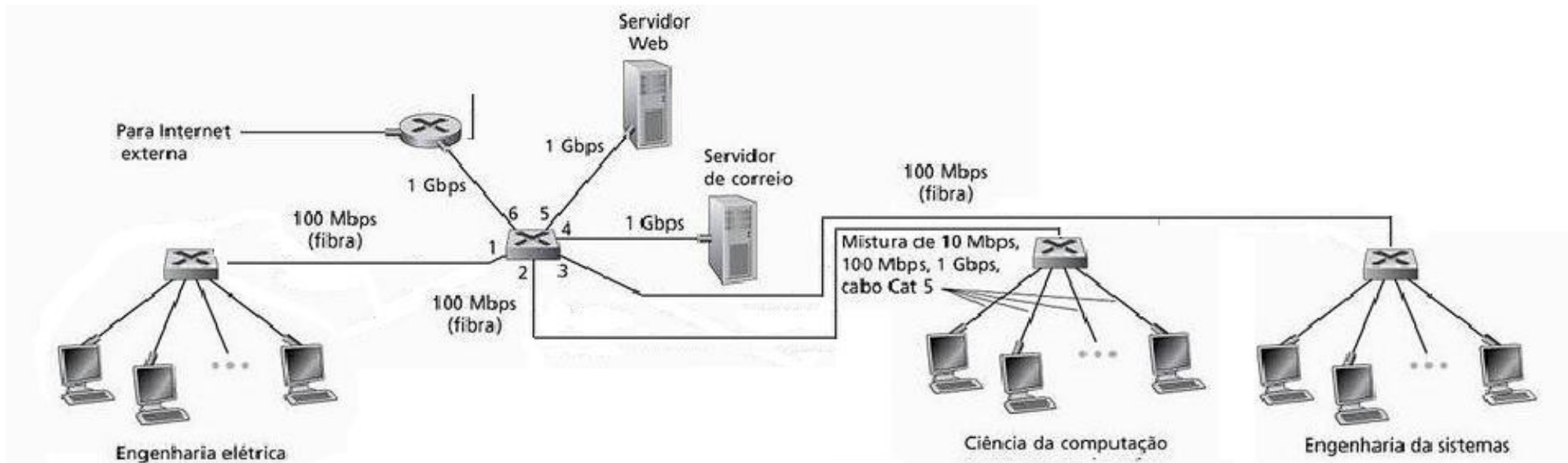
- e.g., considere que algum usuário da Ciência da Computação mude para a Engenharia Elétrica, mas deseja continuar a utilizar a rede e os serviços da rede Ciência da Computação ??
- ... único domínio de “broadcast”, assim, todo tráfego de “broadcast” da camada 2 (ARP, DHCP) cruza a LAN inteira (questões de eficiência, segurança e de privacidade).



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.5 – VLANs: Rede Local Virtual

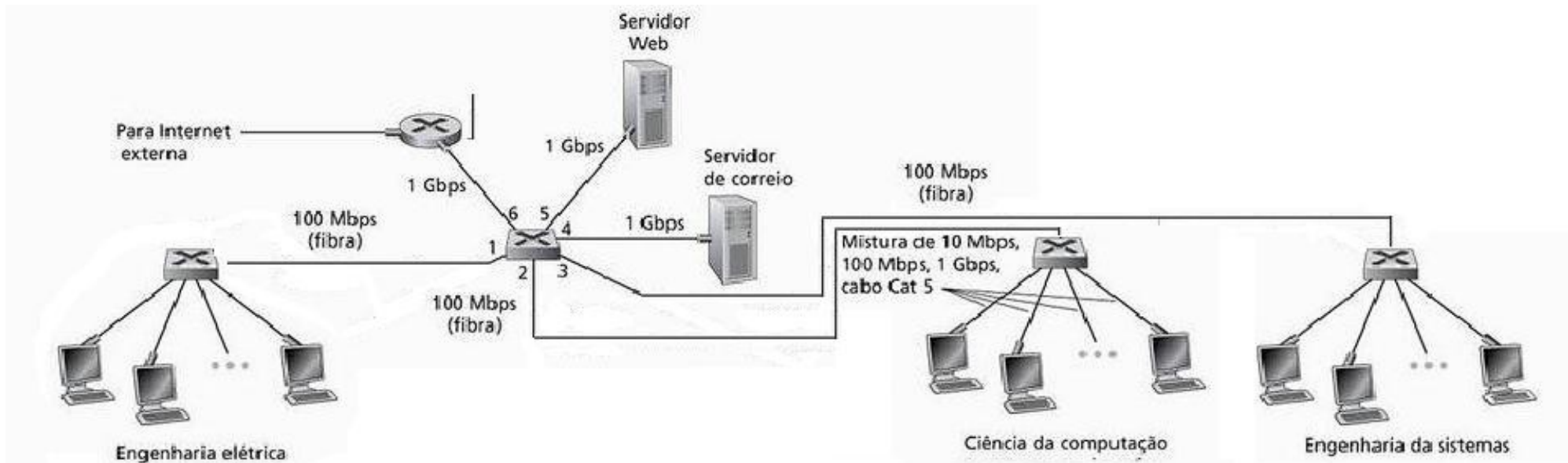
- e.g., considere que algum usuário da Ciência da Computação mude para a Engenharia Elétrica, mas deseja continuar a utilizar a rede e os serviços da rede Ciência da Computação ??
- .. limitar o escopo desse tráfego de difusão aprimora o desempenho da LAN e, talvez mais importante que isso, limita esse tráfego por razões de segurança e privacidade.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.5 – VLANs: Rede Local Virtual

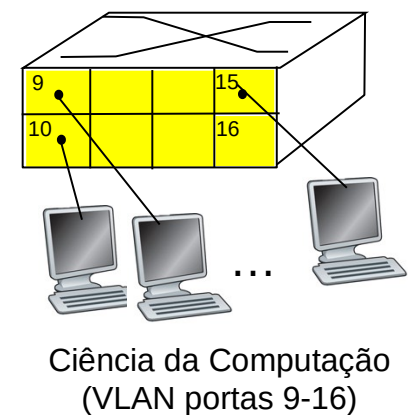
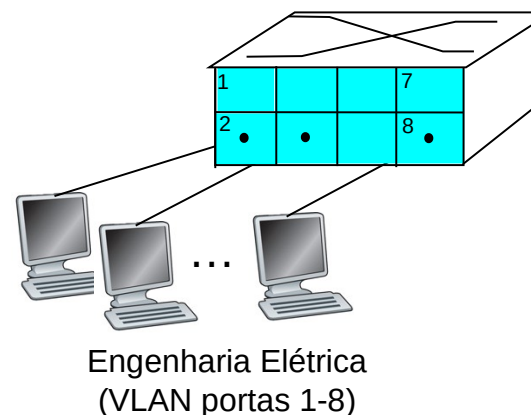
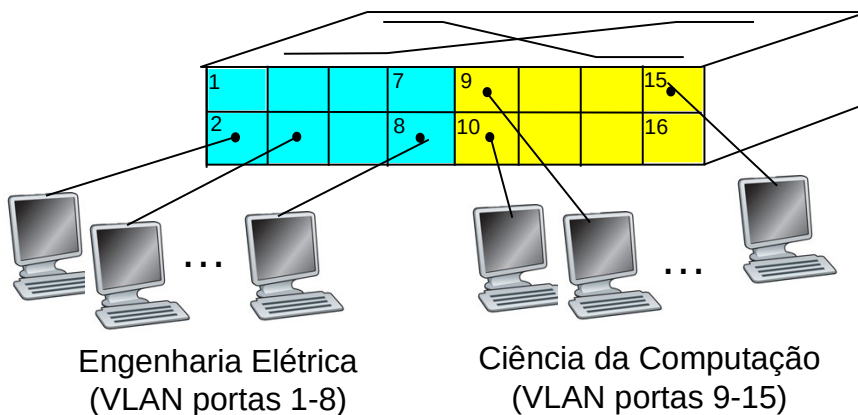
- e.g., considere que algum usuário da Ciência da Computação mude para a Engenharia Elétrica, mas deseja continuar a utilizar a rede e os serviços da rede Ciência da Computação ??
- .. esse tipo de isolamento pode ser substituído trocando o comutador central por um roteador, não obstante, esse isolamento também pode ser realizado por meio de uma solução de comutação.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.5 – VLANs: Rede Local Virtual

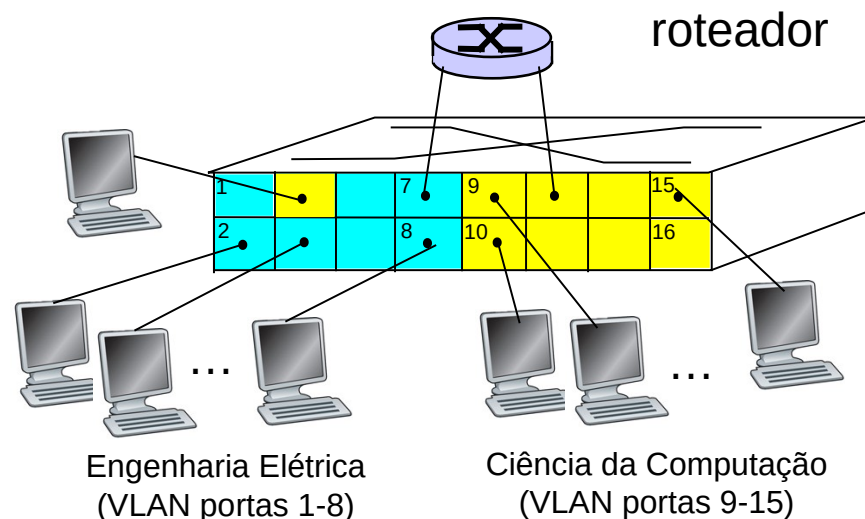
- Virtual LAN (VLAN) .. comutador que oferece suporte as VLAN pode ser configurado para definir múltiplas redes locais virtuais sobre uma única infraestrutura física de rede local.
- VLAN baseada em porta .. portas do comutador são agrupadas (por software de gerenciamento do comutador) para que um único comutador físico opere como múltiplos comutadores virtuais.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Computadores de Enlace

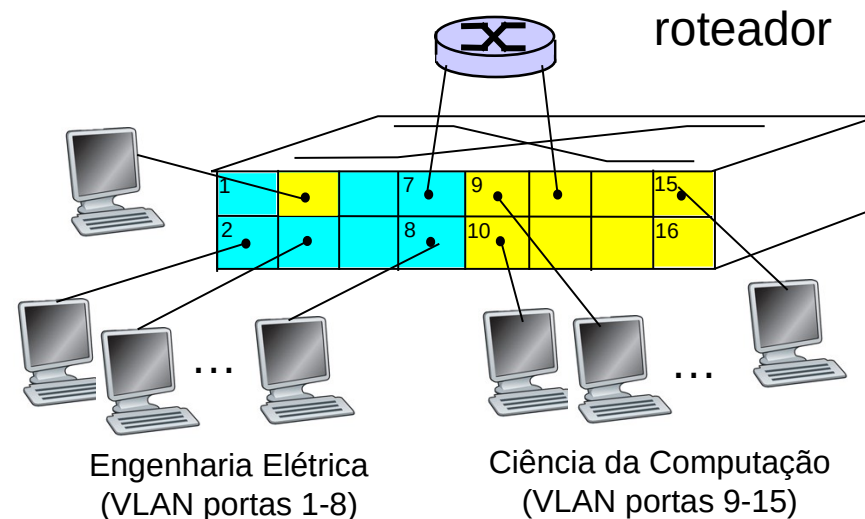
... 5.6.5 – VLANs: Rede Local Virtual

- VLAN baseada em Porta:
- **“isolamento de tráfego”** .. quadros “inbound” e “outbound” das portas 1-8 só podem alcançar portas 1-8.
- ... também é possível definir VLAN com base nos endereços MAC das extremidades, em vez de porta do computador.
- **“inclusão dinâmica”** .. portas podem ser atribuídas dinamicamente entre redes locais (VLANs).



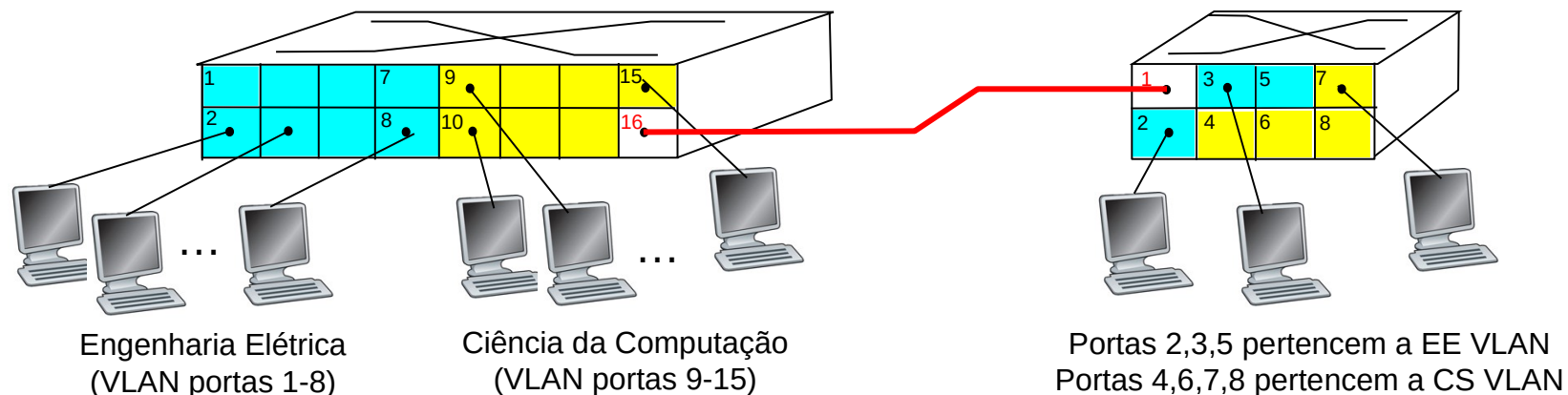
5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace ... 5.6.5 – VLANs: Rede Local Virtual

- VLAN baseada em Porta:
- “**repasse entre VLANs**” - feito por roteamento (assim como em comutadores separados), ou seja, camada de rede.
- ... na prática, vende-se uma combinação de comutador e roteador.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace ... 5.6.5 – VLANs: Rede Local Virtual

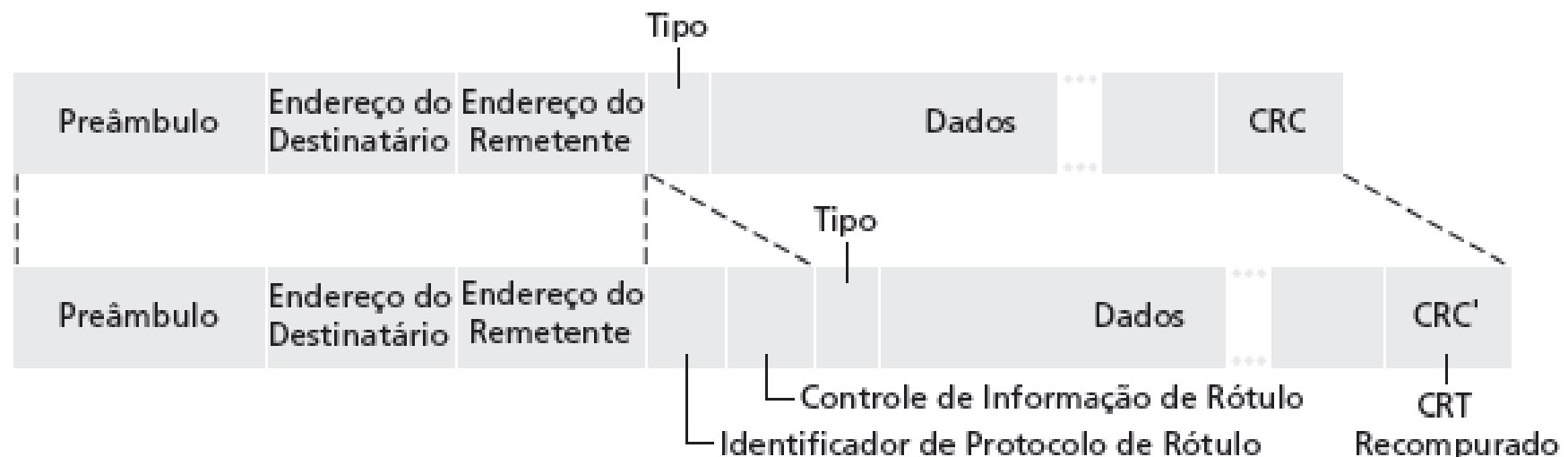
- VLANs spanning multiple Switches:
- “**porta de tronco**” .. carrega quadros entre VLANs definidas sobre vários comutadores físicos.
- .. quadros repassados dentro da VLAN entre comutadores não podem ser quadros 802.1 comuns (devem ter informação de VLAN ID).
- .. protocolo 802.1q inclui campos de cabeçalho adicionais para quadros repassados entre portas de tronco.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.6 - Comutadores de Enlace

... 5.6.5 – VLANs: Rede Local Virtual

- Quadros 802.1 e 802.1Q VLAN:
- Destination/Source MAC (6 bytes); 802.1Q Header (4 bytes)
- Ether Type (2 bytes); Payload (42 a 1500 bytes)
- CRC/"Frame Check Sequence" (4 bytes).



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

5.7 – Protocolo Point-to-Point

- **“enlace point-to-point”** - conecta diretamente 02 nós, um em cada extremidade do enlace e sobre o qual opera o protocolo PPP.
- .. não é necessário controle de acesso ao meio no enlace “point-to-point”, nem mesmo o endereçamento MAC como no Padrão Ethernet.
- e.g., enlace discado, enlace SONET/SDH; conexão X.25 ou um Circuito ISDN (Integrated Service Digital Network).
- PPP .. tornou-se o protocolo preferido para conectar usuários residenciais a seus ISPs por meio de uma conexão discada.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

... 5.7 – Protocolo Point-to-Point

- **“Point-to-Point Protocol” (PPP)** .. protocolo preferido para conectar usuários residenciais a seus ISPs por meio de uma conexão discada.
- Protocolos DLC (Data Link Control) Populares:
- PPP (Point-to-Point Protocol)
- HDLC (High level Data Link Control) .. protocolo de comunicação utilizado na camada 2 em enlaces de dados do Modelo OSI.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

... 5.7 – Protocolo Point-to-Point

- “**exigências**” originais do IETF para o PPP:
- “**enquadramento do pacote**” .. encapsulamento do datagrama da camada de rede em um quadro da camada de enlace.
- .. transporte de dados da camada de rede seja qual for o protocolo da camada de rede e, não somente o IP, ao mesmo tempo.
- .. capacidade de demultiplexar para cima na pilha de comunicação, ou seja, receptor identifica início e fim do quadro bem como pacote da camada de rede tendo por base o protocolo sendo carregado.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

... 5.7 – Protocolo Point-to-Point

- **“exigências”** originais do IETF para o PPP:
- **“transparência”** .. não impor nenhuma restrição sobre os dados que aparecem no pacote da camada de rede.
- **“múltiplos protocolos da camada de rede”** .. deve suportar múltiplos protocolos da camada de rede que executem sobre o mesmo enlace físico e ao mesmo tempo (concomitantemente).
- **“múltiplos tipos de enlaces”** .. deve operar sobre uma grande variedade de tipos de enlaces incluindo enlaces seriais, paralelos, síncronos, assíncronos, de baixa ou alta velocidade.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

... 5.7 – Protocolo Point-to-Point

- **“exigências”** originais do IETF para o PPP:
- **“erros de bits”** .. deve detectar erros de bits no quadro recebido.
- **“vida de conexão”** .. deve ser hábil para detectar uma falha no nível de enlace (p.ex., incapacidade de transferir dados) e sinalizar essa condição de erro à camada de rede.
- **“negociação de endereço”** .. extremidades podem descobrir / configurar endereço de rede umas das outras.
- **“simplicidade”** .. mais de 100 RFCs definem atualmente os vários aspectos desse protocolo “simples”.
- .. “para reflexão” .. com tantas RFCs não parece ser tão simples !!

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

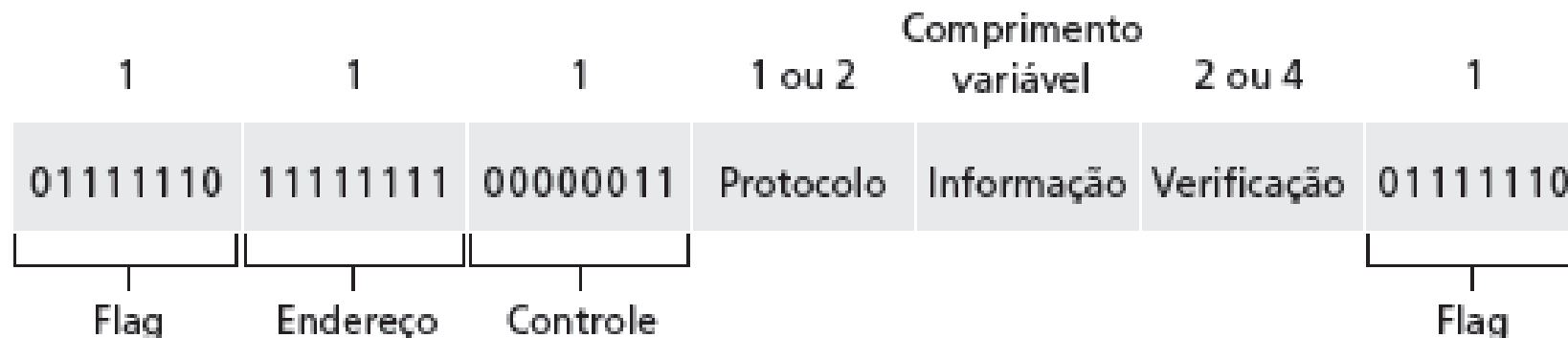
... 5.7 – Protocolo Point-to-Point

- “**não exigências**” originais do IETF para o PPP:
- “**correção de erros**” .. exige-se que o PPP detecte erros, mas não se exige que o PPP os corrija.
- “**controle de fluxo**” .. responsabilidade da camada superior regular a velocidade na qual os pacotes são entregues.
- “**sequenciamento**” .. não exige que o PPP entregue quadros ao enlace receptor na mesma ordem em que foram enviados pelo enlace remetente – ausência de ordem.
- “**enlaces multiponto**” .. precisa operar apenas sobre enlaces com um único remetente e um único receptor.
- “**observação**” .. como os requisitos acima são caracterizados como “**não exigências**”, fica claro que tais requisitos funcionais são delegados para as camadas superiores !!

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

5.7.1 – Quadro de Dados no PPP

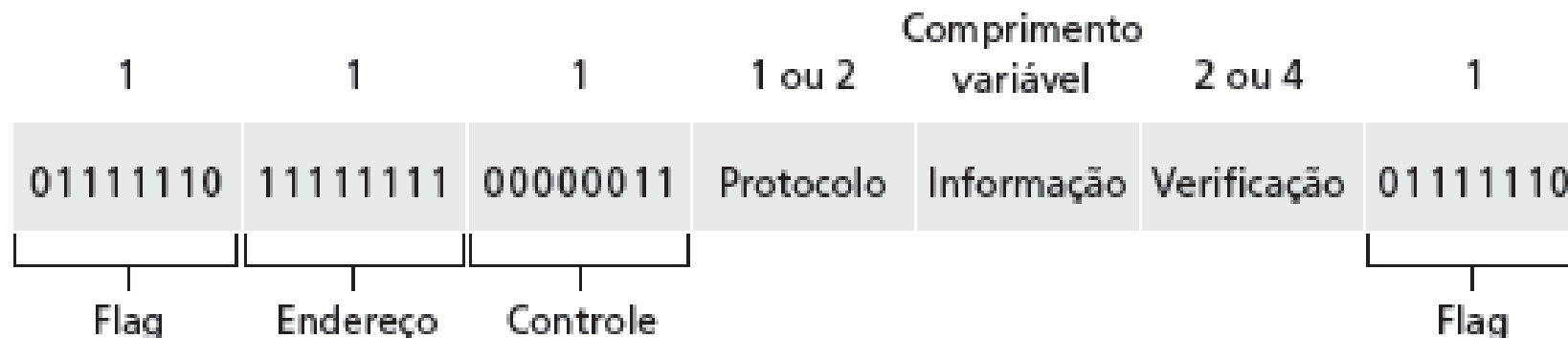
- Quadro de Dados PPP contém os seguintes campos:
- “**flag**” .. indica o começo ou o fim do quadro e consiste da sequência binária padrão >> “01111110”.
- “**endereço**” .. endereço de “broadcast” padrão formado pela sequência de 8 bits iguais a 1 = “11111111”, assim, PPP não atribui individualmente endereços às estações.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

... 5.7.1 – Quadro de Dados no PPP

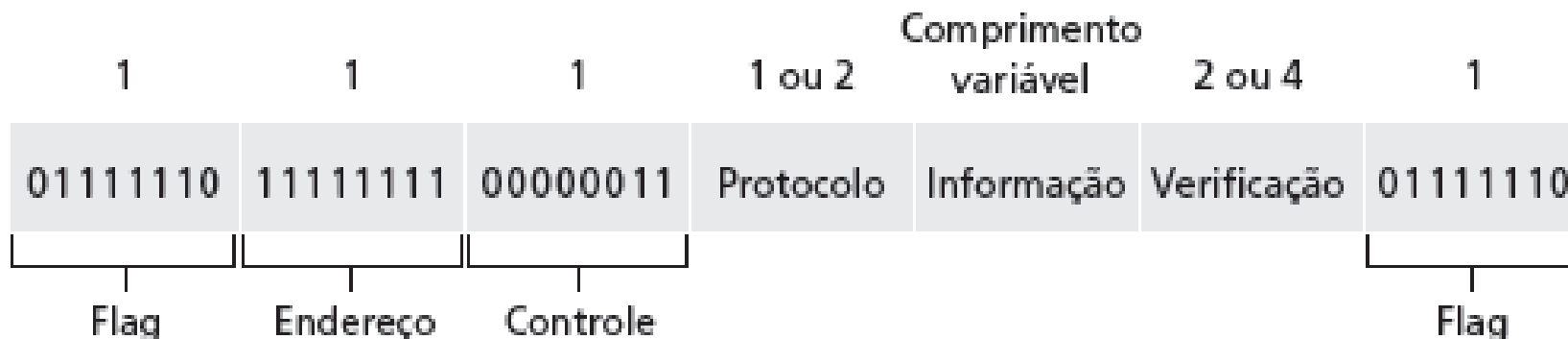
- Quadro de Dados PPP contém os seguintes campos:
- “**controle**” .. valor possível = 00000011 (outros valores podem ser definidos, embora nenhum tenha sido definido ainda).
- “**protocolo**” .. informa ao receptor o protocolo da camada superior ao qual pertence os dados encapsulados no campo de dados.
- suporta e encapsula vários protocolos da camada de rede, p.ex., BCP (Bridge Control Protocol); IPCP (Internet Protocol Control Protocol); IPXCP (Internetworking Packet Exchange Control Protocol).



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

... 5.7.1 – Quadro de Dados no PPP

- **“informação”** .. encapsula o pacote e tem por comprimento máximo padrão 1500 bytes (Maximum Transmission Unit - MTU), embora possa ser alterado quando o enlace é inicialmente configurado.
- ... final do campo de dados é encontrado localizando-se a sequência de “flags” de fechamento cuja sequência binária é “01111110”.
- **“Frame Check Sequence”** .. usado para detectar erros de bits no quadro e utiliza o CRC padrão HDLC de 2 ou 4 bytes, mas normalmente 2 bytes de comprimento.



5 - Camada de Enlace / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

... 5.7.1 – Quadro de Dados no PPP

- PPP contempla 04 fases para estabelecer uma comunicação:
- **“estabelecimento do enlace”** .. nó de origem envia quadros LCP (Link Control Protocol) para estabelecer o enlace de dados.
- **“negociação de configuração”** .. nó de origem envia quadros LCP (Link Control Protocol) para configurar o enlace de dados.
- **“negociação de configuração do protocolo da camada de rede”** .. nó de origem envia quadros NCP (Network Control Protocol) para escolha e configuração de protocolos da camada de rede.
- **“encerramento do enlace”** .. enlace permanece configurado para as comunicações até que os quadros LCP ou NCP (Network Control Protocol) encerrem o enlace.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

... 5.7.1 – Quadro de Dados no PPP

- PPP contempla 01 fase opcional ao estabelecer comunicação:
- “**qualidade do enlace**” .. enlace é testado para determinar se sua qualidade é suficiente para ativar os protocolos da camada rede.
- Tipos de Quadros LCP (Link Control Protocol):
- “**estabelecimento de enlace**” .. estabelecer e configurar um link.
- “**manutenção de enlace**” .. usados para gerenciar e depurar um link.
- “**encerramento de enlace**”.. usados para encerrar um link.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

5.7.2 – Byte Stuffing no PPP

- “**problema**” .. qualquer protocolo que utiliza um padrão específico de bits, p.ex. campo “flag”, terá problemas caso a sequência de bits faça parte dos demais campos do quadro.
- “**solução**” .. garantir que o padrão não se repita em qualquer ponto do quadro exceto nos pontos de início e fim do mesmo.
- “**requisito de transparência de dados**” .. campo de dados deve poder incluir padrão de flag “01111110” sem que seja interpretado como início ou fim de quadro de dados.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

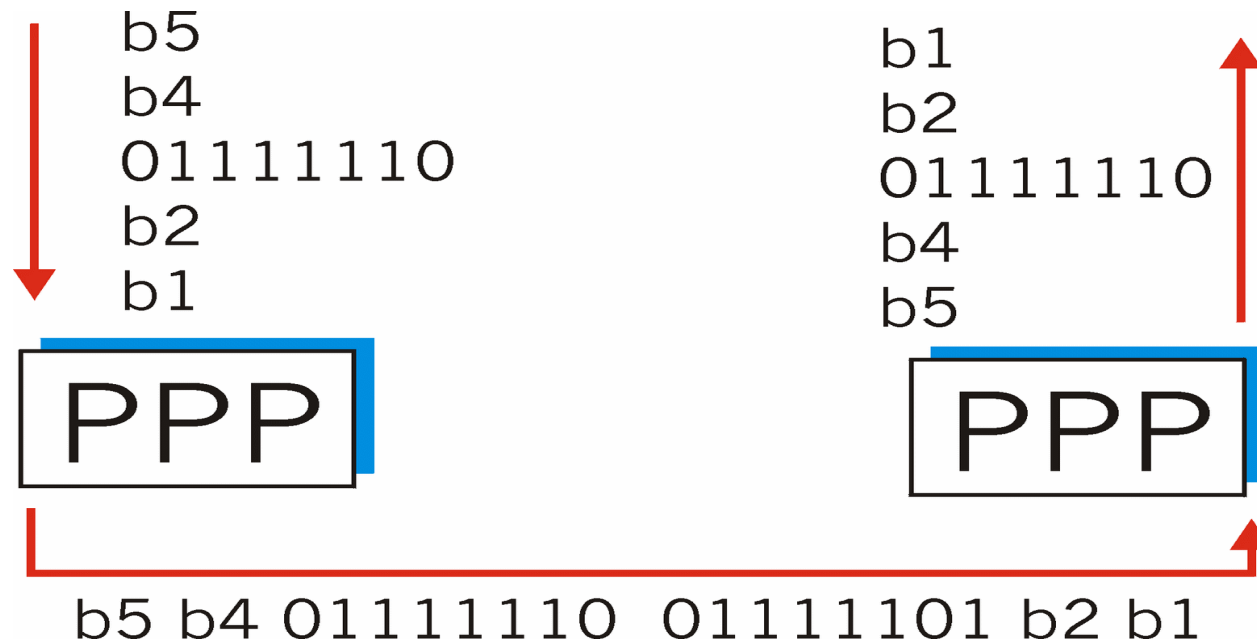
... 5.7.2 – Byte Stuffing no PPP

- **“requisito de transparência de dados”** .. campo de dados deve poder incluir padrão de flag “01111110”.
- identificar a sequência “01111110” no receptor como dado ou flag ? ... para consistência é necessário identificar a seq. como “flag” !
- ... assim uma solução é incluir no remetente a sequência “01111110” extra após cada byte de dados cuja sequência seja “01111110”.
- ... isto irá permitir que o receptor identifique se a sequência deve ser tratada como “flag” ou como “dados” ao longo do quadro.
- **“destinatário”** .. se 02 bytes 01111110 em sequência forem encontrados, é necessário descartar o 1º byte e continuar a receber os dados.
- ... assim teremos uma única sequência “01111110” - byte de flag.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.7 - Protocolo Point-to-Point

... 5.7.2 – Byte Stuffing no PPP

- e.g., “padrão de byte de flag” nos dados a enviar (01111110) e “padrão de byte de flag” mais byte incluído nos dados transmitidos, ou seja, “01111110 .. 01111110”



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

5.8 – Virtualização de Enlace no MPLS

- PPP é frequentemente usado sobre uma conexão de modem discado, p.ex. rede de telefonia, entre 02 “hosts”.
- “**rede de telefonia**” .. rede global de telefonia logicamente separada, com seus próprios comutadores, enlaces e pilhas de protocolos para transferência e sinalização de dados.
- ... da perspectiva da camada de rede, a Arq. TCP/IP virtualiza a rede de telefonia como uma tecnologia de camada de enlace que provê conectividade de camada de enlace entre 02 hosts.
- **MPLS (MultiProtocol Layer Switch)** – diferentemente da rede de telefonia de comutação de circuitos, as Redes MPLS são redes de comutação de pacotes por circuitos virtuais.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8 – Virtualização de Enlace no MPLS

- MPLS (MultiProtocol Layer Switch) .. diferentemente da rede de telefonia de comutação de circuitos, as Redes MPLS são redes de comutação de pacotes por circuitos virtuais.
- ... da perspectiva da Rede Internet, podemos considerar a Rede MPLS, assim como a Rede de Telefonia e a Ethernet, como tecnologias da camada de enlace que servem para interconectar dispositivos IP.
- ... assim como MPLS, Frame Relay e ATM também podem ser usadas para interconectar dispositivos IP, embora representem uma tecnologia ligeiramente mais antiga, mas ainda disponibilizada.
- “**camadas de abstrações**” .. não se preocupe com os detalhes da camada inferior, apenas trate os detalhes de forma abstrata.

5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

- “**comutação de pacotes por circuitos virtuais**” .. repasse de pacotes se dá tendo por base os rótulos de circuitos e não o endereço de destino contido no pacote.
- “**comutação de rótulos multiprotocolo**” .. com o intuito de melhorar o repasse dos roteadores IP, adotou-se um conceito fundamental nas redes de circuitos virtuais que é o rótulo de tamanho fixo.
- .. essas técnicas trabalham de mãos dadas com o IP, usando endereçamento e roteamento IP.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

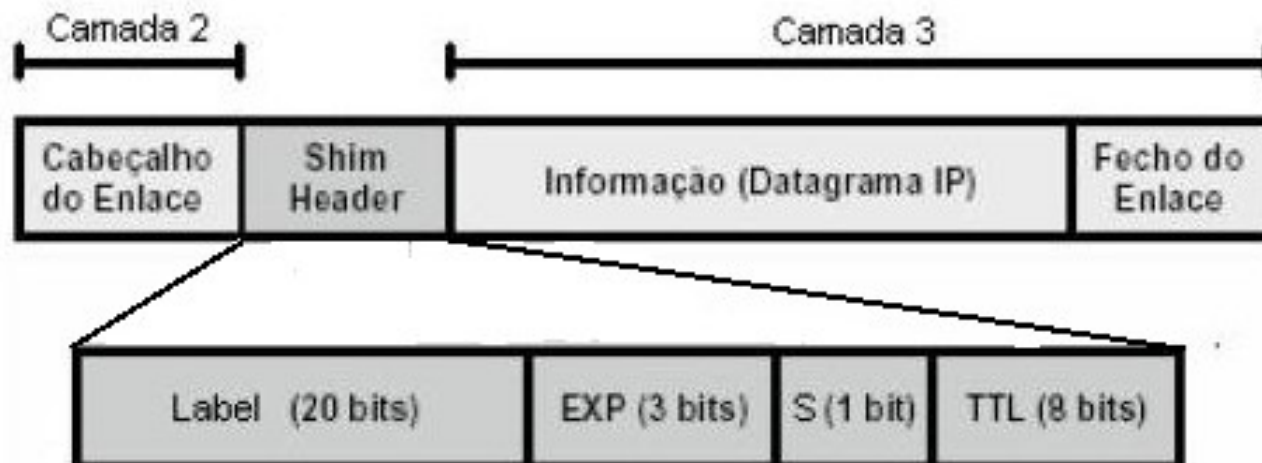
... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

- “**idéia**” .. rotular pacotes de modo que roteadores os repassem tendo por base circuitos virtuais e rótulos de tamanho fixo em vez de endereços de destino IP (roteamento na Arq. TCP/IP).
- “**objetivo**” .. unir as técnicas de roteamento de pacotes rotulando-os seletivamente para que o roteador possa repassá-los através de circuitos virtuais ou através do endereço de destino.
- “**rótulo**” .. representa um índice na tabela de roteamento do próximo roteador, assim, pacotes com o mesmo rótulo e mesma classe de serviço, por isso recebem o mesmo tipo de tratamento.
- Obs.: IETF reuniu esses esforços no protocolo MPLS [RFCs 3031, 3032] misturando as técnicas de circuitos virtuais em uma rede de datagramas com roteadores.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

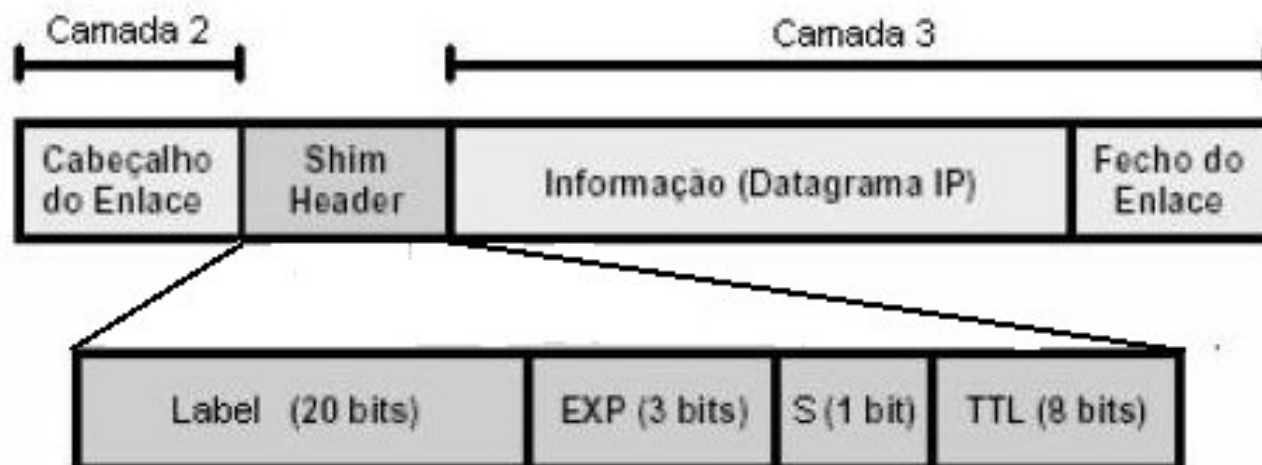
- **“Quadro MPLS”** ... quadro da camada de enlace (PPP ou Ethernet) tem um pequeno cabeçalho MPLS adicionado entre o cabeçalho PPP/Ethernet e o cabeçalho IP.
- ... evidente que um quadro melhorado com MPLS só pode ser enviado entre roteadores habilitados para MPLS.
- ... roteador não habilitado para MPLS ficará bastante confuso ao encontrar um cabeçalho MPLS onde espera encontrar o IP !!



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

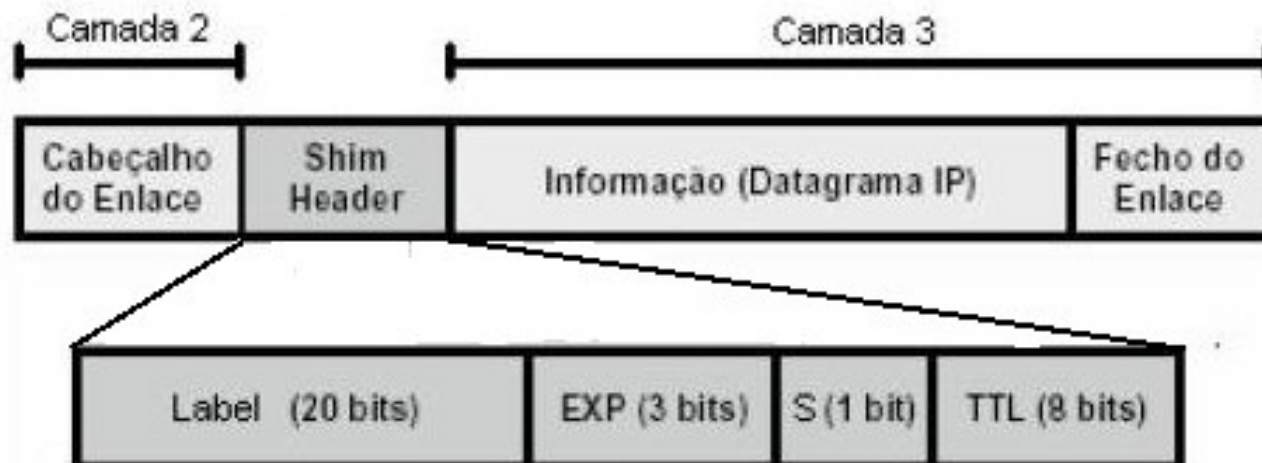
- **“roteador de comutação de rótulos”** .. roteador habilitado p/ MPLS.
- ... pois repassa um quadro MPLS consultando o rótulo MPLS em sua tabela de repasse e, então, passando imediatamente o datagrama para a interface de saída apropriada.
- ... roteamento se dá pelo rótulo, ou seja, não é necessário extrair o endereço de destino e executar uma busca para fazer a compatibilização com o prefixo mais longo na tabela de repasse.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

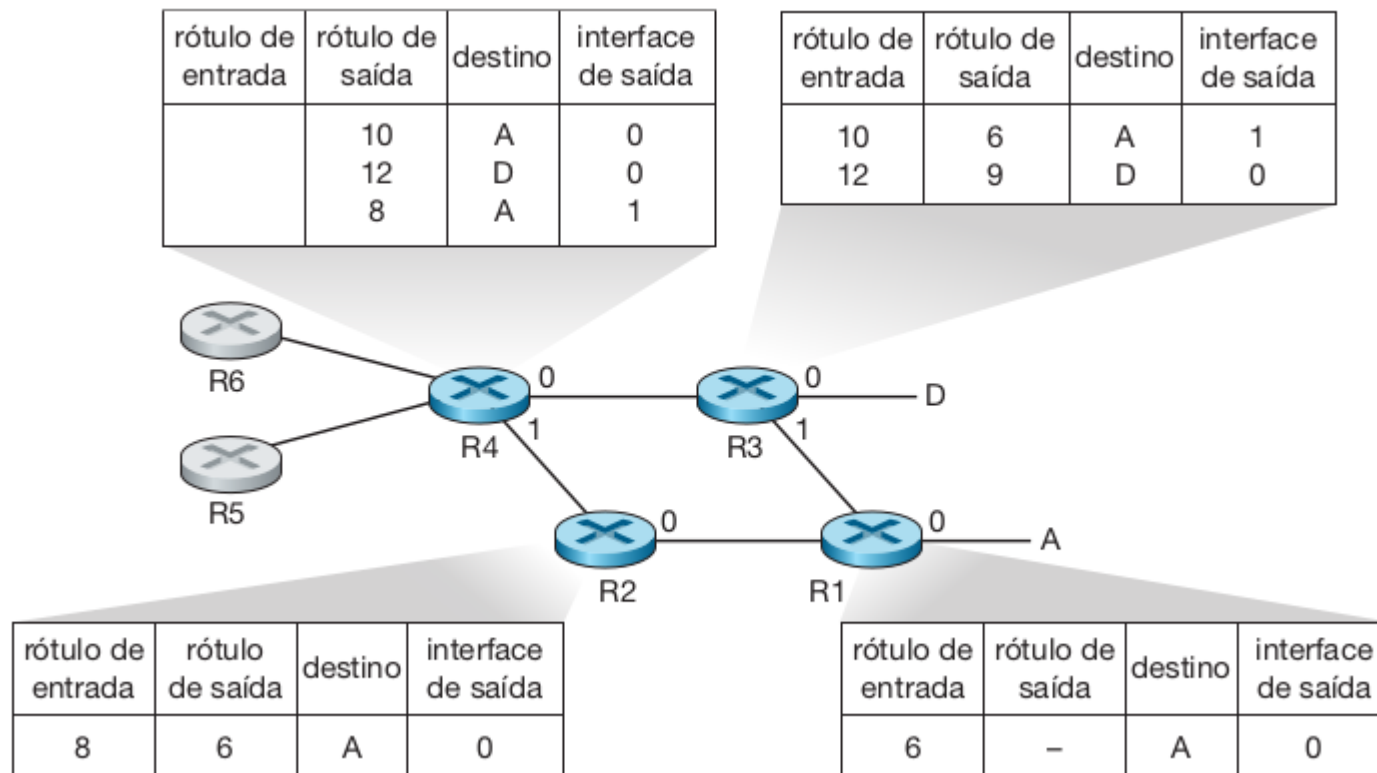
- “**Quadro MPLS**” .. quadro da camada de enlace (PPP ou Ethernet) tem um pequeno cabeçalho MPLS adicionado entre o cabeçalho PPP/Ethernet e o cabeçalho IP.
- “**rótulo**” (20 bits) .. identificador do circuito virtual.
- “**experimental**” (3 bits) .. reservado.
- “**S**” (1 bit) .. indica o final de uma série de rótulos MPLS.
- **TTL** (8 bits) .. tempo de vida do pacote.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

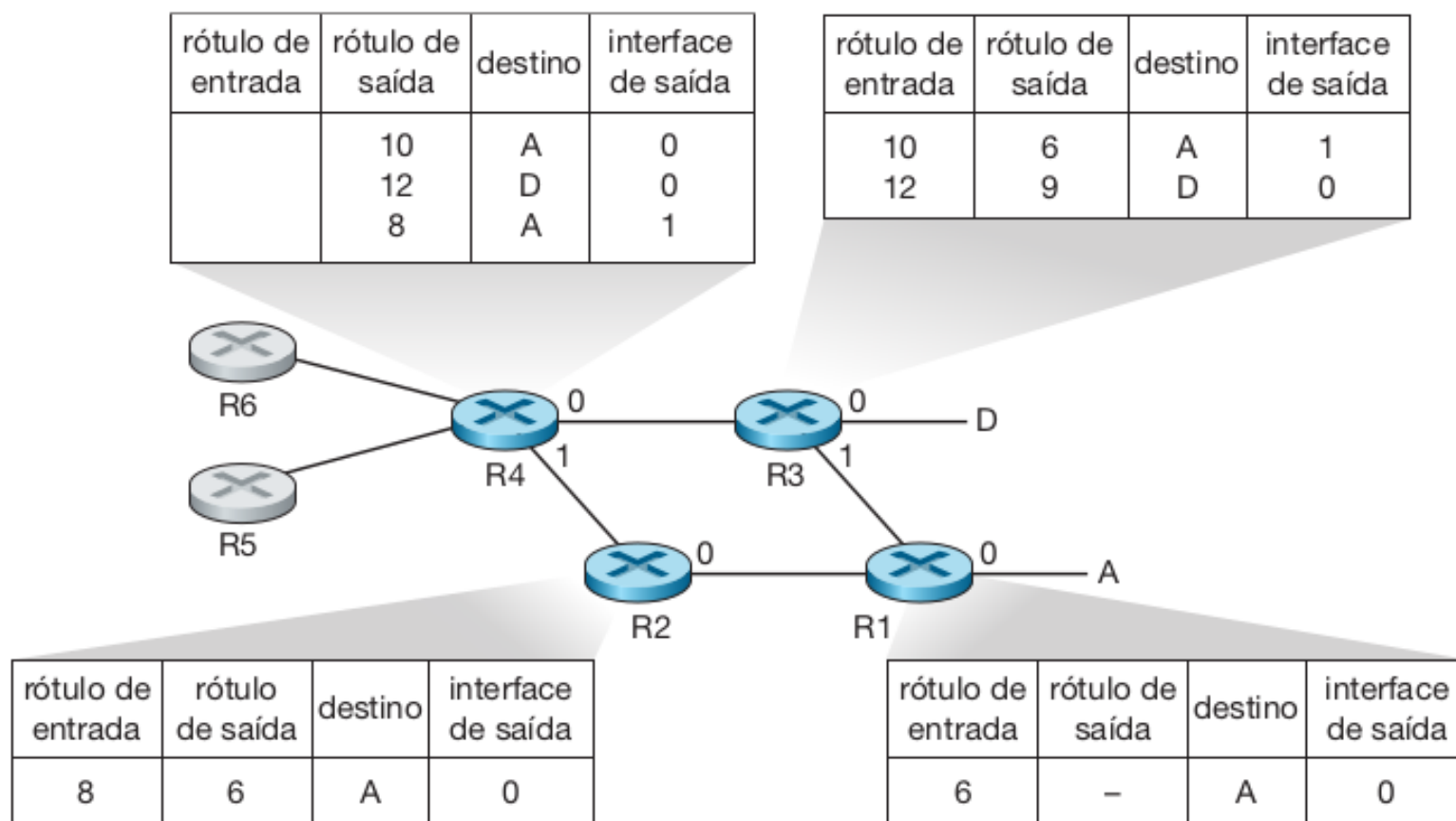
- e.g., Considere que os roteadores R1, R2, R3 e R4 como habilitados para MPLS, enquanto R5 e R6 são roteadores IP padrão.
- R1 anuncia a R2 e R3 que pode rotear para o destino A, e que um quadro recebido com rótulo MPLS 6 será repassado ao destino A.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

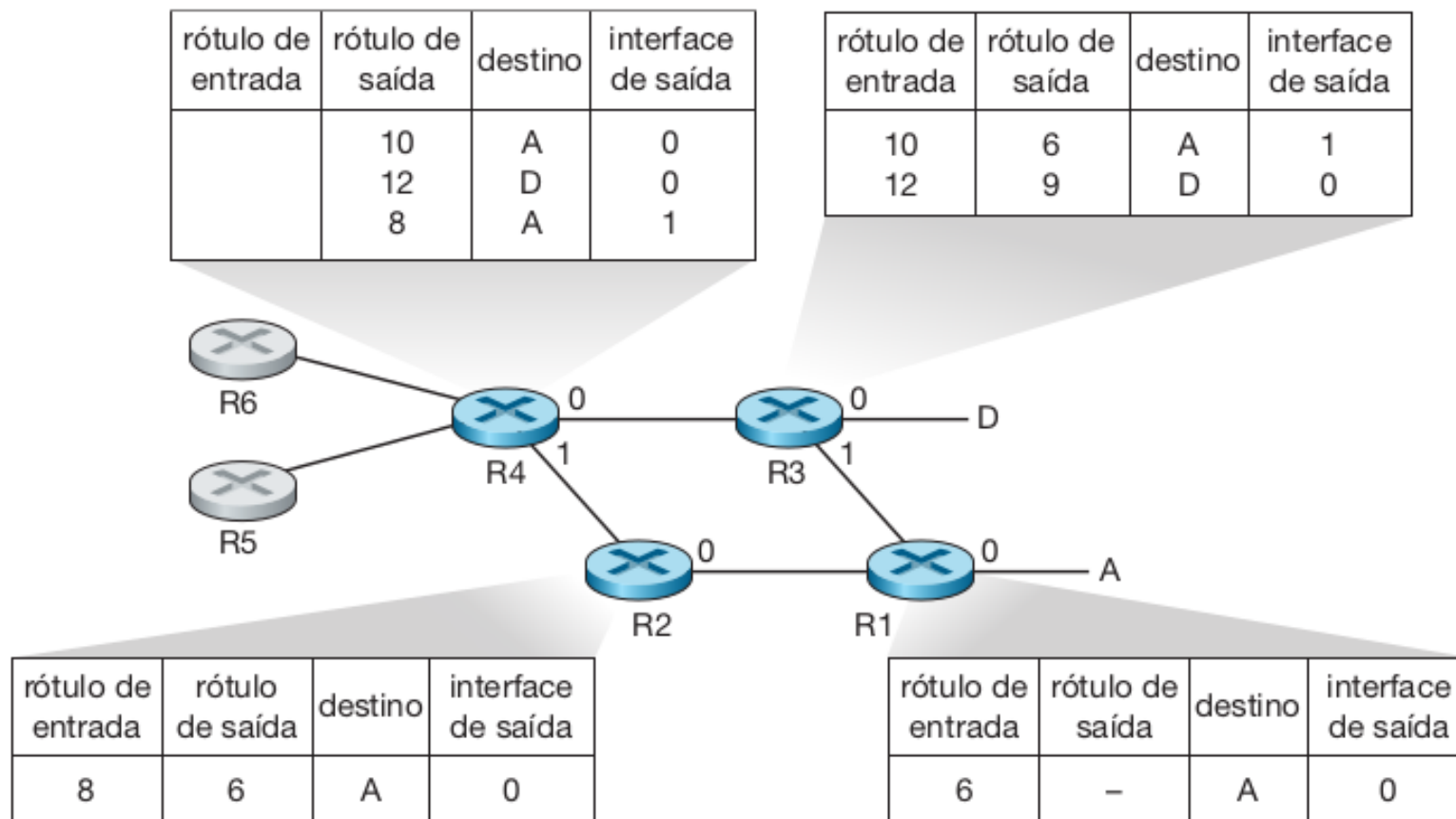
- Roteador R3 anuncia ao roteador R4 que ele (R3) pode rotear para os destinos A e D e que os quadros que estão chegando com rótulos MPLS 10 e 12 serão comutados na direção desses destinos.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

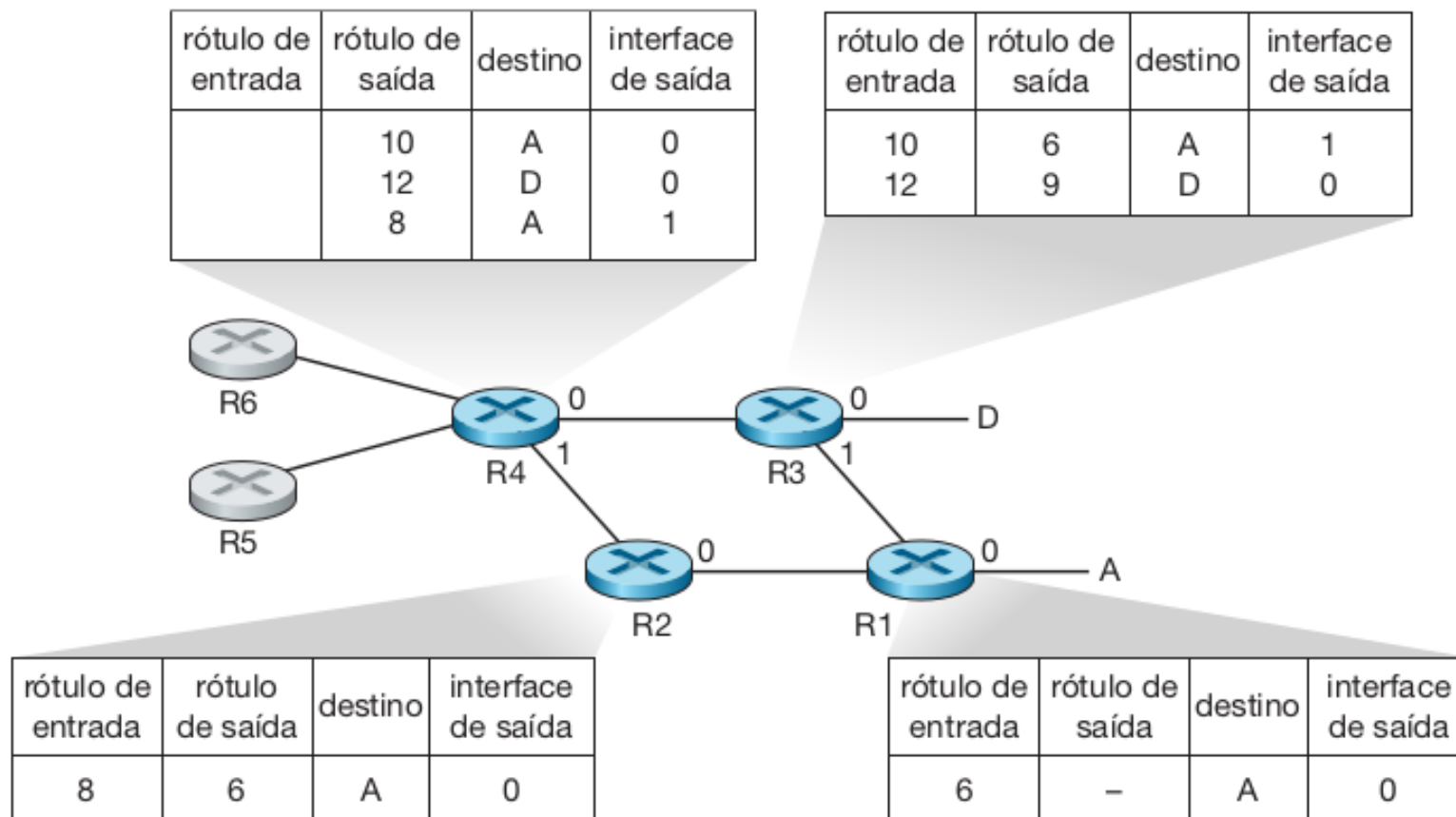
- Roteador R2 também anuncia ao roteador R4 que pode alcançar o destino A e que um quadro recebido com o rótulo MPLS 8 será comutado na direção de A.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

- Roteador R4 está na interessante posição de ter 02 caminhos MPLS para chegar até A, ou por meio da interface 0 com rótulo MPLS de saída 10, ou pela interface 1 com um rótulo MPLS 8.



5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

- “**análise**” .. dispositivos IP R5, R6, A e D estão conectados em conjunto via uma infraestrutura MPLS (R1, R2, R3 e R4) praticamente do mesmo modo como uma LAN comutada.
- .. mesma análise se aplica para uma Rede ATM que permite a conexão dos dispositivos IP R5, R6, A e D entre si.
- “**conclusão**” .. do mesmo modo que uma LAN comutada ou uma rede ATM, os roteadores R1, R2, R3 e R4 habilitados para MPLS proporcionam a interconexão sem jamais tocar o Cabeçalho IP.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

- Embora o MPLS contemple a comutação com base nos rótulos sem considerar o endereço IP do pacote, as “**principais vantagens**” são:
- “**gerenciamento do tráfego**” .. provê a capacidade de repassar pacotes por rotas que não seria possível com protocolos padrões de roteamento IP, ou seja, engenharia de tráfego.
- ... pode ser utilizado para restauração rápida de caminhos de repasse MPLS, p.ex., mudar a rota de tráfego que passa por um caminho previamente calculado, em resposta à falha de enlace.
- “**velocidade**” .. possibilita o aumento substancial de velocidade de comutação fase a comutação baseada em rótulos.

5 - Camada de Enlace Lógico / 5.8 - Virtualização de Enlace: MPLS

... 5.8.1 – Comutação de Rótulos em MPLS

- “**grande interesse pelo MPLS**” .. não estão nos aumentos substanciais nas velocidades de comutação, mas nas novas capacidades de gerenciamento de tráfego que o MPLS proporciona.
- “**finalidades / utilização**” .. pode ser usado para realizar restauração rápida de caminhos de repasse MPLS, p.ex., mudar a rota do tráfego que passa por um caminho previamente calculado, restabelecido, em resposta à falha de enlace [Kar, 2000; Huang, 2002; RFC 3469].
- ... também pode ser usado para isolar os recursos e o endereçamento utilizados pela VPN do cliente dos outros usuários que estão cruzando a rede do IS - DeClercq [2002].