

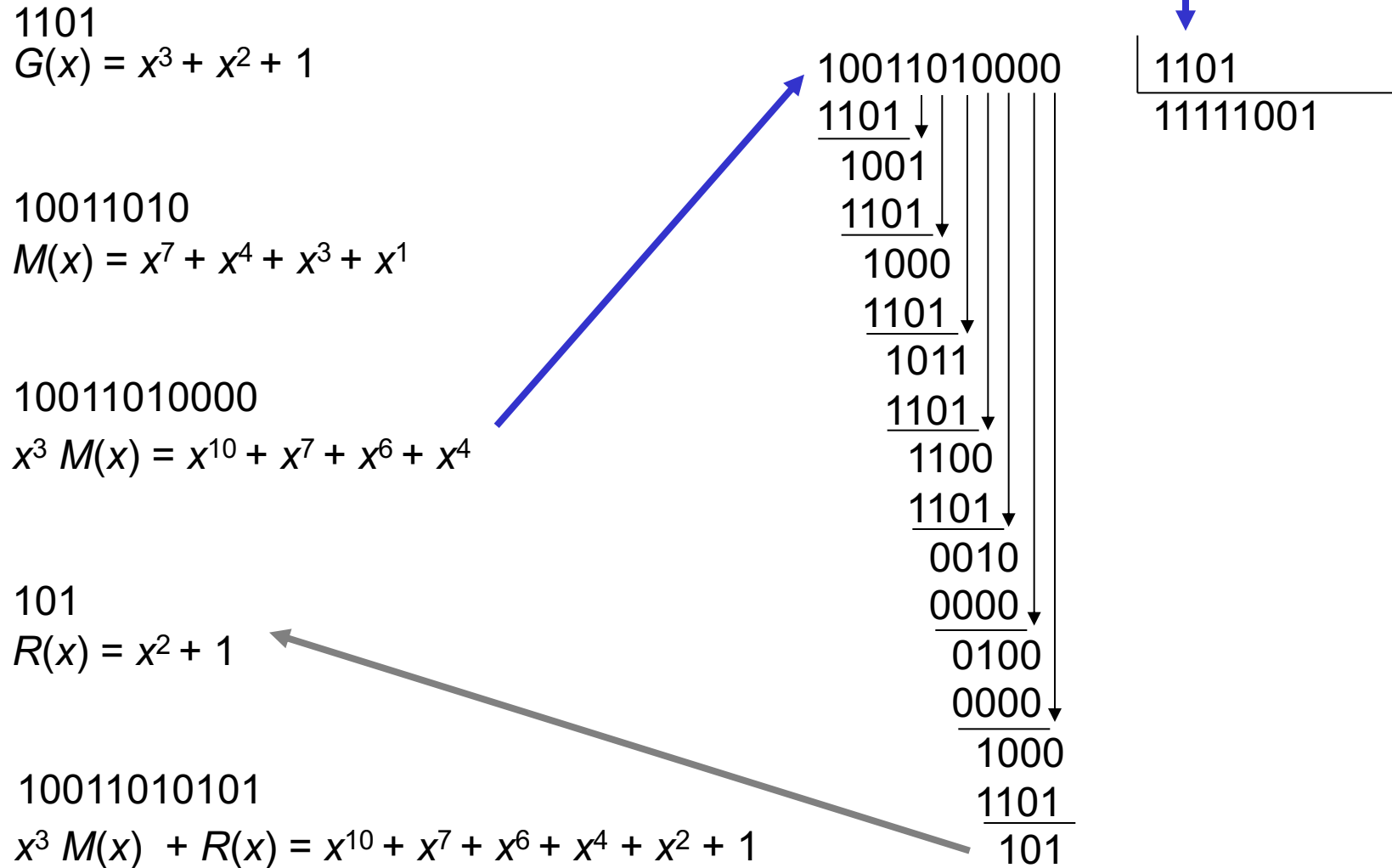
Camada da ligação de dados

- ❑ Detecção de erros com códigos cíclicos de verificação
- ❑ Controlo de acesso múltiplo
- ❑ Endereçamento físico
- ❑ Tecnologias
 - Ethernet, IEEE 802.3
 - IEEE 802.1D
 - IEEE 802.11

Código cíclico de verificação (CRCs)

- ❑ Polinómio gerador de grau r
- ❑ Mensagem de m bits é interpretada como um polinómio $M(x)$ de coeficientes binários e grau inferior a m
- ❑ Cálculo do CRC
 - Dividendo é $x^r M(x)$; divisor é $G(x)$; resto da divisão é $R(x)$
 - Mensagem transmitida é $T(x) = x^r M(x) + R(x)$ (divisível por $G(x)$)
 - Mensagem recebida é $V(x) = T(x) + E(x)$
- ❑ Detecção de erros
 - Se $V(x)$ for divisível por $G(x)$, então mensagem é aceite

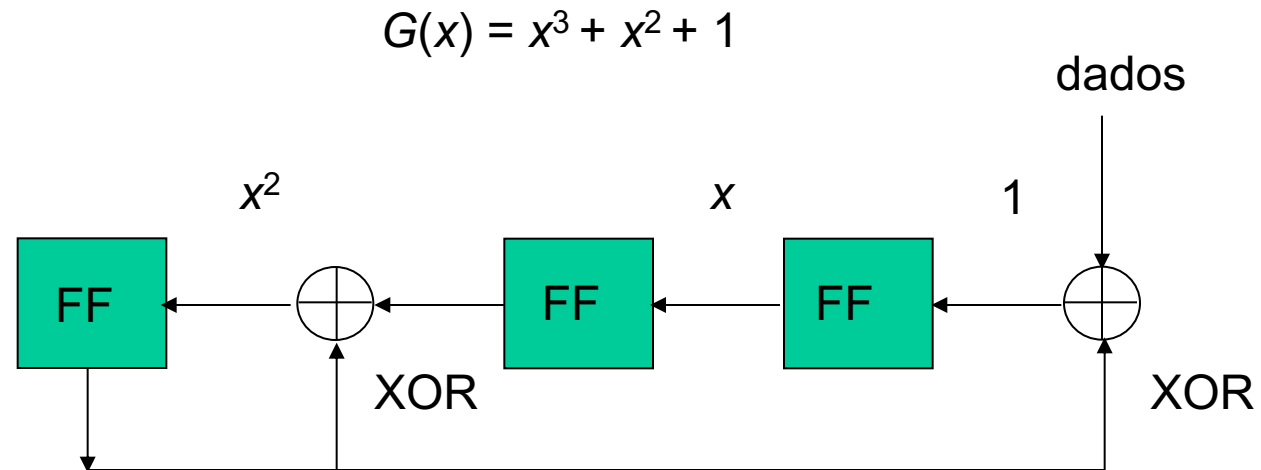
CRC: exemplo



CRC: propriedades

- ❑ Mensagem recebida é $T(x) + E(x)$, em que $E(x)$ é o padrão de erros
- ❑ Padrão de erros é detetado se e só se $E(x)$ não é divisível por $G(x)$
- ❑ Para $G(x) = G'(x)(x + 1)$ com $G'(x)$ um polinómio irredutível de grau $r-1$:
 - Erros simples são detetados
 - Erros duplos são detetados em tramas com menos do que 2^{r-1} bits
 - Número ímpar de erros é detetados
 - Rajadas de erros de comprimento inferior ou igual a r são detetadas
 - Rajadas de erros de comprimento $r + 1$ só não são detetadas com probabilidade $1/2^{r-1}$

CRC: implementação em hardware



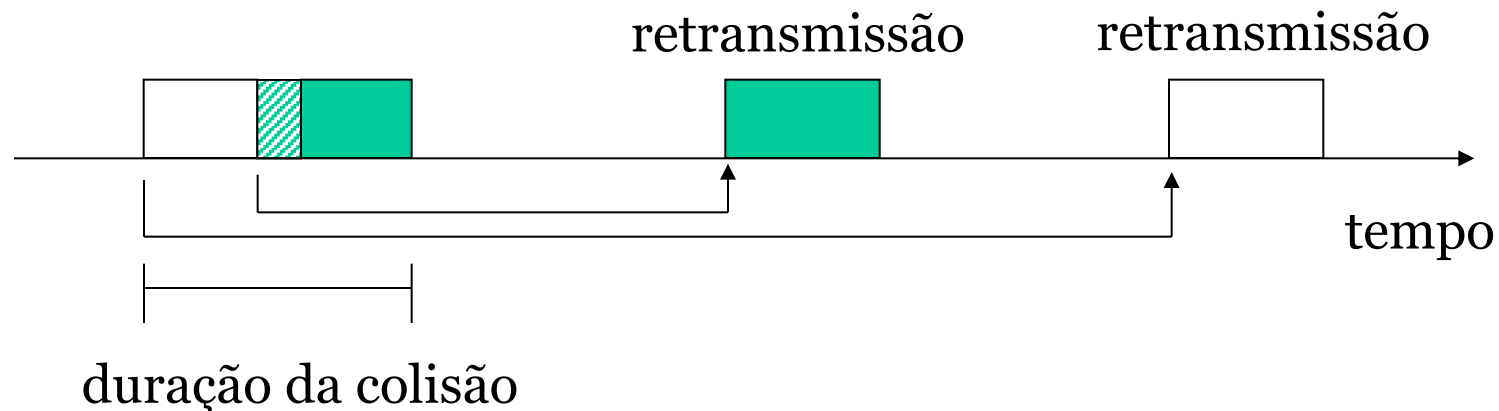
Canais de difusão: acesso múltiplo

- ❑ Atribuição fixa
 - TDMA
 - FDMA
 - CDMA
- ❑ **Protocolos de acesso aleatório**
 - ALOHA
 - CSMA; CSMA/CD; CSMA/CA
- ❑ Protocolos de atribuição dinâmica
 - Passagem de testemunho
 - Sondagem (*polling*)

ALOHA

Colisão: sobreposição de duas ou mais tramas na receção

- ❑ Nó transmite uma trama nova logo que ela está disponível
- ❑ Nó deteta que uma trama foi perdida (colisão)
 - Calendariza a retransmissão da trama para um instante futuro, escolhido aleatoriamente



ALOHA: modelo

- ❑ Tramas com L bits
- ❑ Canal de capacidade c bits/s
- ❑ Transmissão de tramas (novas e retransmissões) à taxa média de g tramas por segundo
- ❑ Taxa média de envio de tramas por tempo de transmissão de trama é $G = gL/c$
- ❑ Todas as tramas que colidem na receção são perdidas
- ❑ Pretende-se determinar a utilização S do canal

Processo de Poisson

- Número de tramas transmitidas num intervalo de duração t :

$$P\{k \text{ transmissões}\} = e^{-gt} \frac{(gt)^k}{k!}$$

- Intervalos entre transmissões consecutivas são variáveis aleatórias i.i.d. com distribuição exponencial negativa:

$$P\{\text{intervalo entre transmissões} > t\} = e^{-gt}$$

ALOHA: utilização

- ❑ Probabilidade de uma trama ser recebida com sucesso:

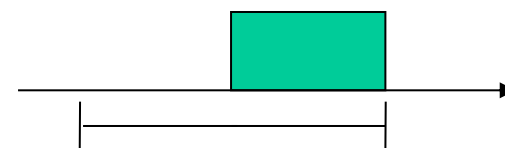
$$P\{\text{sucesso}\} = e^{-2gL/c} = e^{-2G}$$

- ❑ Utilização do canal

$$S = Ge^{-2G}$$

- ❑ Utilização máxima do canal

$$S_{max} = 1/(2e) = 18 \%$$



Período vulnerável: $2L/c$

Recuo binário exponencial

t_{cava} – duração de uma cava, da ordem de grandeza do período vulnerável

b – número de cavas inicial

i – número de colisões já sofridas pela trama

t_{recuo} – tempo de recuo até à transmissão da trama

$$t_{recuo} = \text{aleatorio}[0 .. b \times 2^i - 1] \times t_{cava}$$

Iniquidade entre as estações cujas tramas sofreram poucas colisões e aquelas cujas tramas que sofreram muitas colisões

Protocolos com melhor utilização do canal

❑ ALOHA sincronizado (*slotted ALOHA*)

- Tempo dividido em cavas; estações só podem transmitir no início de uma cava
- Período vulnerável igual ao tempo de transmissão de uma trama

❑ *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA)

- Estação não transmite um trama se perceber que o canal está ocupado
- Período vulnerável igual ao atraso de ida-e-volta

❑ CSMA/*Collision Detection* (CSMA/CD)

- Estação aborta a sua transmissão se detetar outra transmissão simultânea
- Duração da colisão igual ao atraso de ida-e-volta

Conhecimento comum de uma colisão

c – capacidade do canal [bit/s]

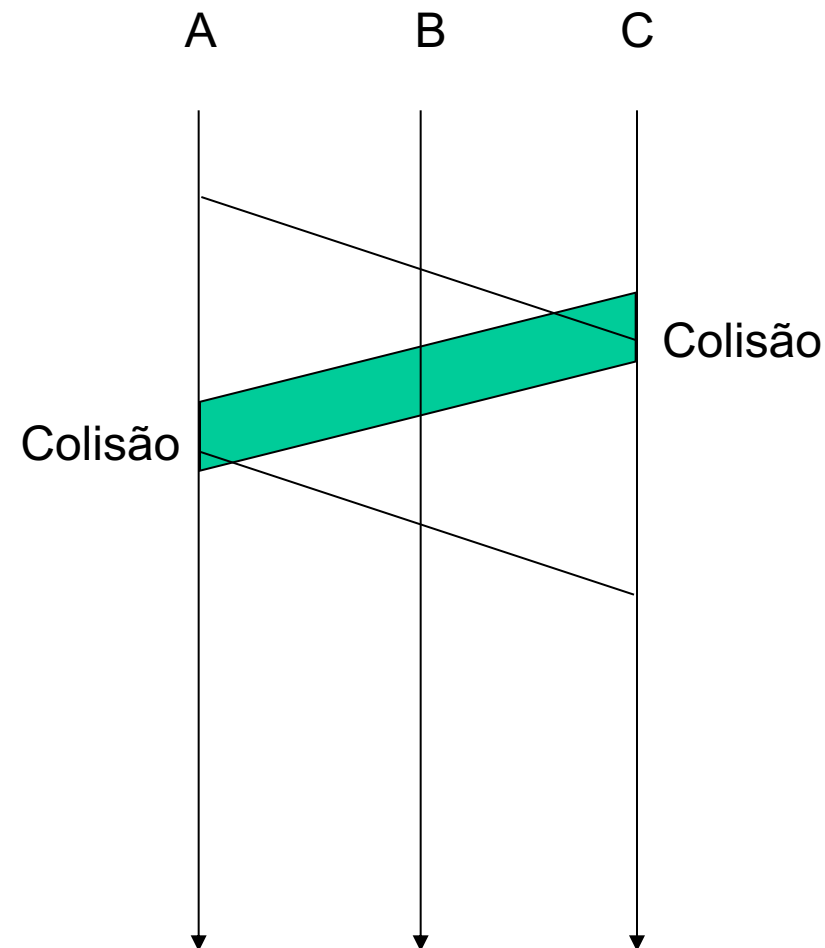
τ – atraso de propagação máximo [s]

L – tamanho de um pacote [bits]

Colisão em cada nó que transmite

$$L \geq 2\tau c$$

Tamanho dos pacotes não deve ser inferior ao produto largura-de-banda-atraso!



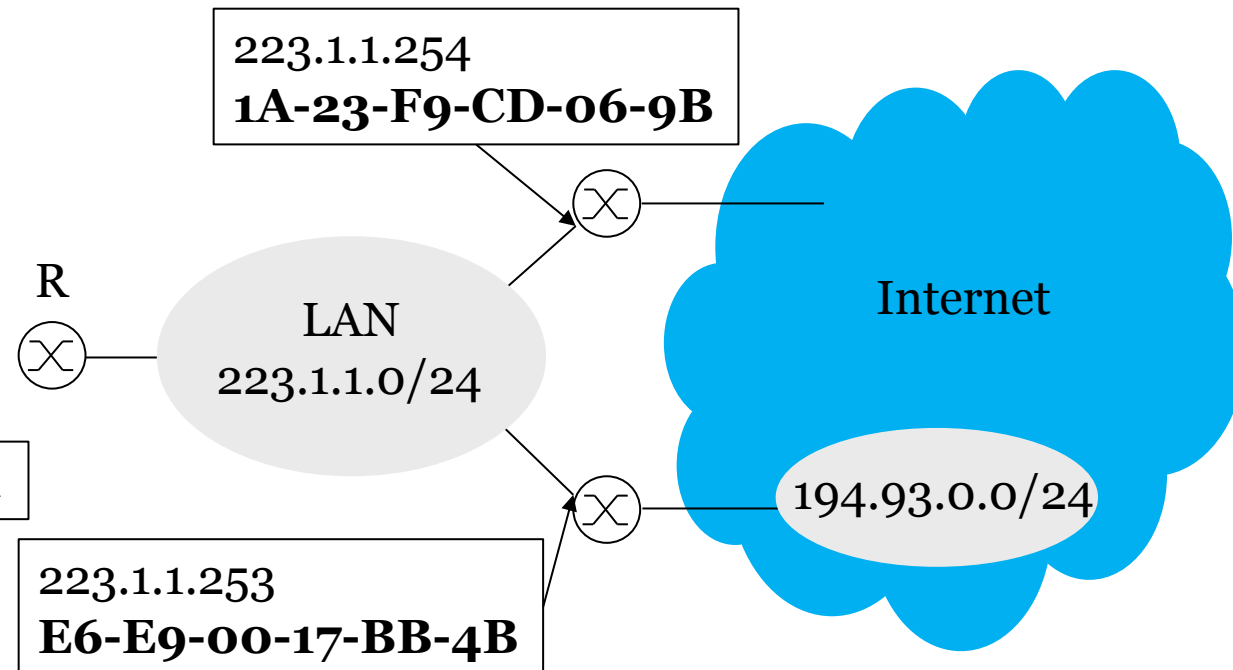
Endereçamento MAC

Tabela de expedição em R

Prefixo	Interface
194.93.0.0/24	223.1.1.253
...	
223.1.1.0/24	local

Tabela de correspondência de endereços em R

IPv4	MAC
223.1.1.253	E6-E9-00-17-BB-4B
223.1.1.254	1A-23-F9-CD-06-9B

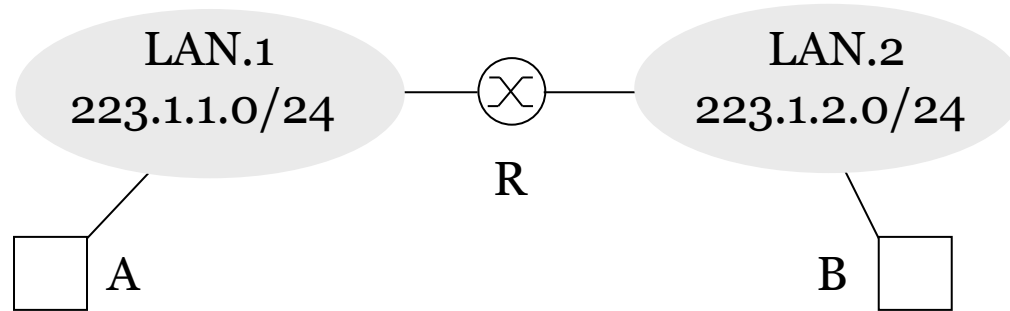


As tramas são guiadas na LAN para a interface IP adequada através do endereço MAC desta

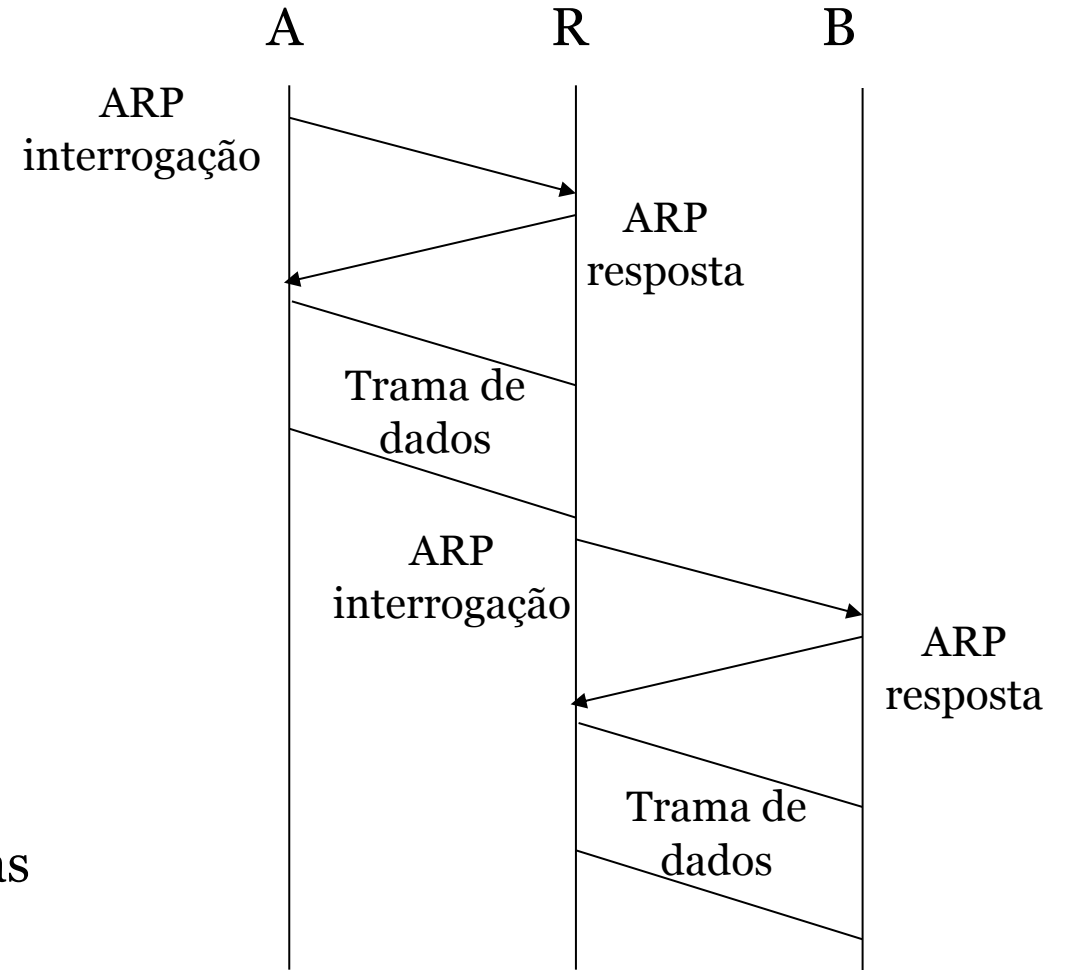
Address Resolution Protocol (ARP)

- ❑ A sabe o endereço IP de B e pretende saber o seu endereço MAC
- ❑ A difunde uma trama ARP de interrogação contendo o endereço IP de B
 - Trama é recebida por todas as interfaces na LAN
- ❑ B reconhece o seu endereço IP na trama ARP de interrogação e responde a A com uma trama ARP de resposta que contem o seu endereço MAC
 - B fica a saber a correspondência (Endereço IP de A, Endereço MAC de A)
- ❑ A recebe a trama ARP de resposta e guarda em memória a correspondência (Endereço IP de B, Endereço MAC de B)
- ❑ As correspondências (Endereço IP, Endereço MAC) são datadas

ARP – diagrama espaço-tempo



Inicialmente, as tabelas ARP em A e R estão vazias



Ethernet: anatomia das tramas

8	6	6	2	46-1500	4
Preambulo	End. destino	End. origem	Tipo	Dados	CRC

- ❑ Preambulo: 7 bytes, cada da forma 10101010, seguido do byte 10101011
- ❑ Endereços: Bit I/G; organização; série
- ❑ Tipo: chave de desmultiplexagem
- ❑ Dados: MTU entre 46 e 1500 bytes; enchimento
- ❑ CRC: $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

Ethernet: CSMA/CD

- ❑ Canal livre durante 96 bits
 - Transmite trama
- ❑ Detecta colisão
 - Aborta transmissão
 - Reforça colisão durante 32 bits
 - Espera $k \times 512$ bits
- ❑ Recuo binário exponencial truncado
 - Na i -ésima colisão, o nó escolhe aleatoriamente um número natural entre 0 e $2^{\min(i,10)} - 1$

Ethernet: tecnologias

- ❑ 10BASE2 (802.3a-1985)
 - Cabo coaxial fino
 - Distância máxima sem repetidores é 185 m
- ❑ 10BASE-T (802.3i-1990), 100BASE-T (802.3u-1995)
 - Pares entrelaçados
 - Nós estão fisicamente ligados a hubs
 - Distância máxima do nó ao hub é 100 m
- ❑ 100BASE-FX
 - Como 100BASE-TX mas os cabos são em fibra óptica
- ❑ 1000BASE-T (802.3ab-1999)
 - Usada sobretudo em modo full-duplex
- ❑ 10GBASE-T (IEEE 802.3an-2006)
- ❑ A distância máxima de um domínio de colisão é de 256 (64x8/2) bits para o funcionamento correto do CSMA/CD

Comutadores: filtragem, expedição e aprendizagem

EO– endereço origem

ED– endereço destino

tab (p) – tabela de endereços associados ao porto p

Aprendizagem

recebe trama <ED, EO, Trama> no porto p

if EO **in** tab(q) para algum q

 retira EO de tab(q)

adiciona EO a tab(p)

if ED **not in** tab(p)

if ED **in** tab(q) para algum q

 envia <ED, EO, Trama> por q

else

for all x != p

 envia <ED, EO, Trama> por x

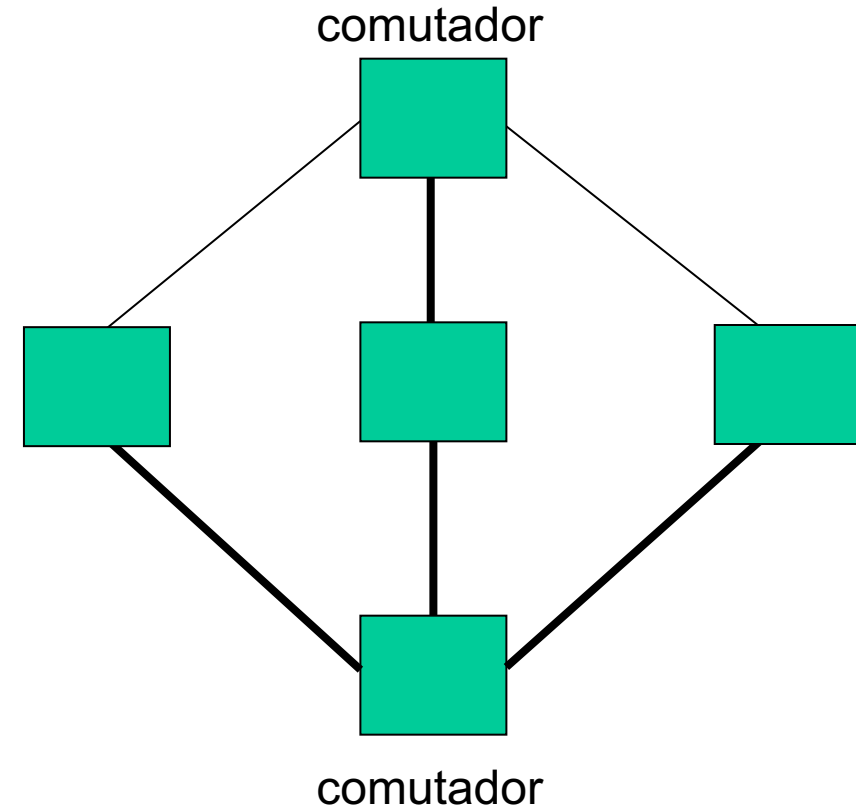
Filtragem

Difusão

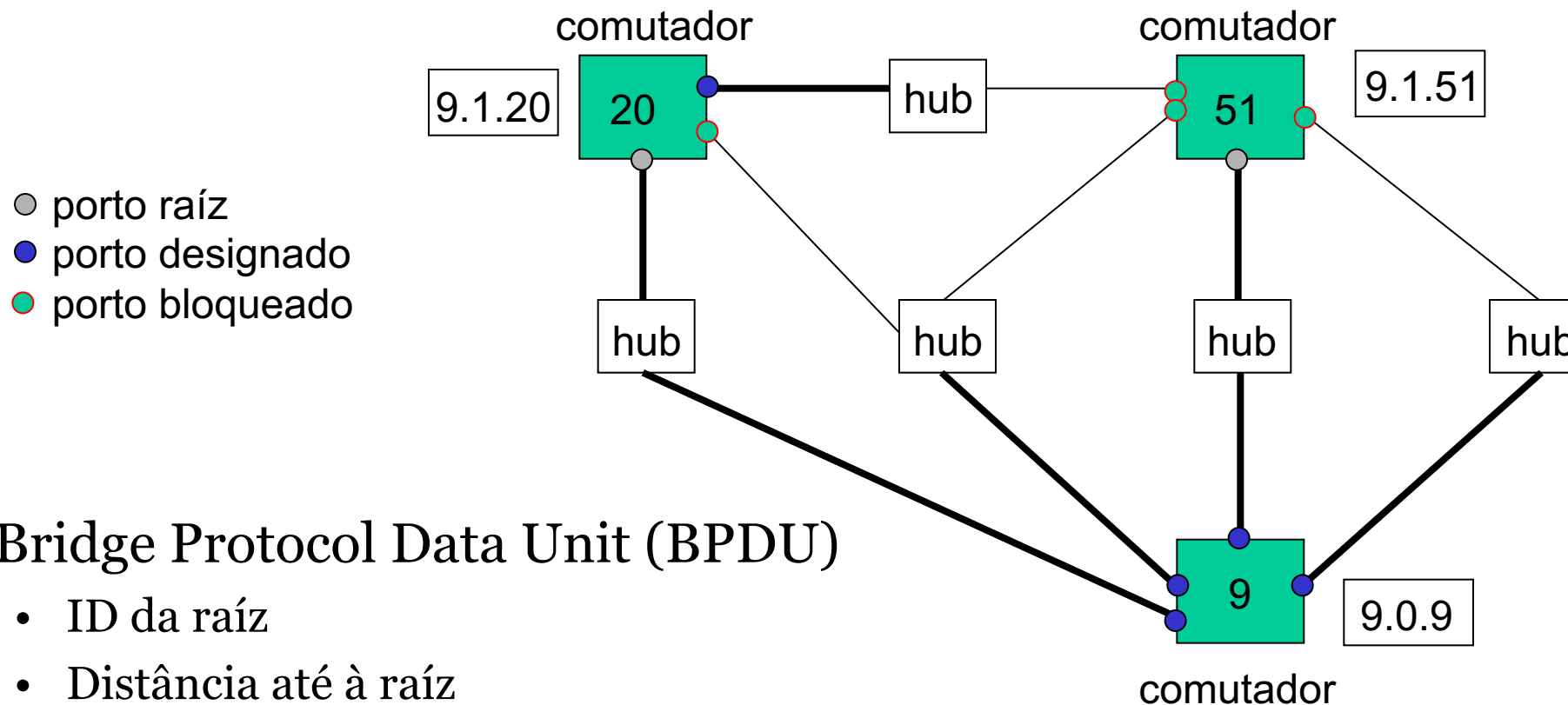
Expedição seletiva

Interligação de computadores

- ❑ Difusão de tramas condicional a comunicação a ser ao longo de uma árvore abrangente
- ❑ Como determinar uma árvore abrangente?
 - Escolhendo um nó raiz e usando vetor distância tendo esse nó como destino
- ❑ Como determinar o nó raiz?
 - Por eleição distribuída



Algoritmo de árvore abrangente



❑ Bridge Protocol Data Unit (BPDU)

- ID da raíz
- Distância até à raíz
- ID do computador

Algorythm

por Radia Perlman

(adaptado do poema "Trees" de Alfred Joyce Kilmer)

I think that I shall never see
A graph more lovely than a tree.
A tree whose crucial property
Is loop-free connectivity.
A tree which must be sure to span.
So packets can reach every LAN.
First the root must be selected
By ID it is elected.
Least cost paths from root are traced
In the tree these paths are placed.
A mesh is made by folks like me
Then bridges find a spanning tree.

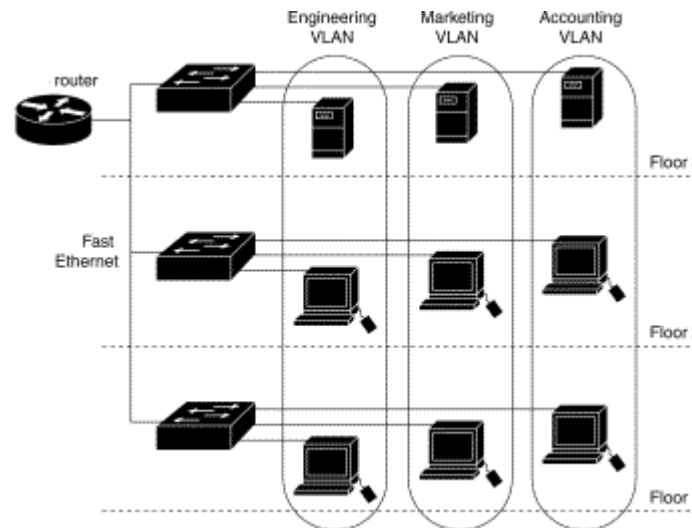
I think that I shall never see
A poem lovely as a tree.
A tree whose hungry mouth is prest
Against the earth's sweet flowing breast;
A tree that looks at God all day,
And lifts her leafy arms to pray;
A tree that may in summer wear
A nest of robins in her hair;
Upon whose bosom snow has lain;
Who intimately lives with rain.
Poems are made by fools like me,
But only God can make a tree.

Encaminhadores vs. comutadores

- ❑ Ambos são dispositivos de armazenagem e expedição (*store-and-forward*)
- ❑ Encaminhadores
 - Camada de rede
 - Encaminhamento baseado em caminhos mais curtos
 - Cada interface tem um endereço IP (expedição)
 - Proteção contra tempestades de difusão
- ❑ Comutadores
 - Camada de ligação de dados
 - Encaminhamento suportado em árvore abrangente
 - Nenhuma interface tem endereço MAC (expedição)
 - Sem proteção contra tempestades de difusão

LANs virtuais (VLANs)

- ❑ Interfaces do comutador podem ser divididas em grupos, correspondentes a VLANs distintas
- ❑ Comutador tem internamente um encaminhador para interligar as VLANs
- ❑ A mesma VLAN em comutadores diferentes pode ser interligada com *trunking*



Redes sem fios IEEE 802.11

❑ IEEE 802.11b

- 2.5 GHz
- Até 11 Mbps
- DSSS

❑ IEEE 802.11g

- 2.5 GHz
- Até 54 Mbps
- DSSS/OFDM

❑ IEEE 802.11a

- 5 Ghz
- Até 54 Mbps
- OFDM

❑ IEEE 802.11n

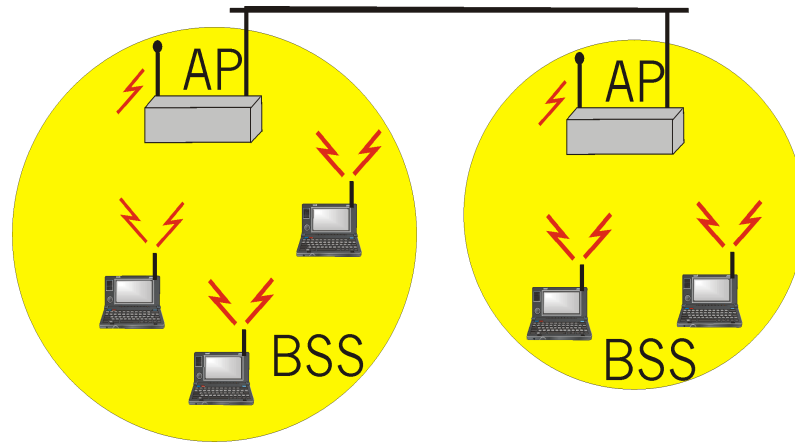
- 5 GHz
- Até 600 Mbps
- MIMO

❑ IEEE 802.11ac

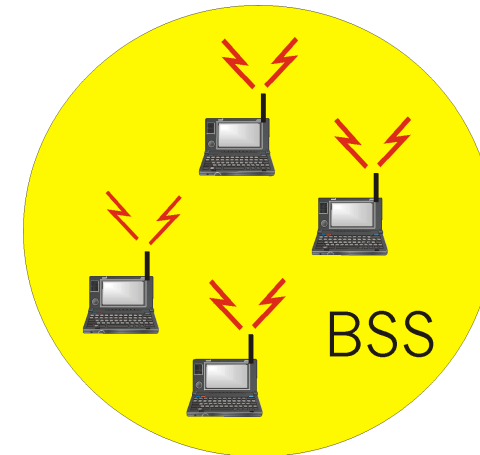
- 5 GHz
- Até 1000 Mbps
- MU-MIMO

Arquitecturas

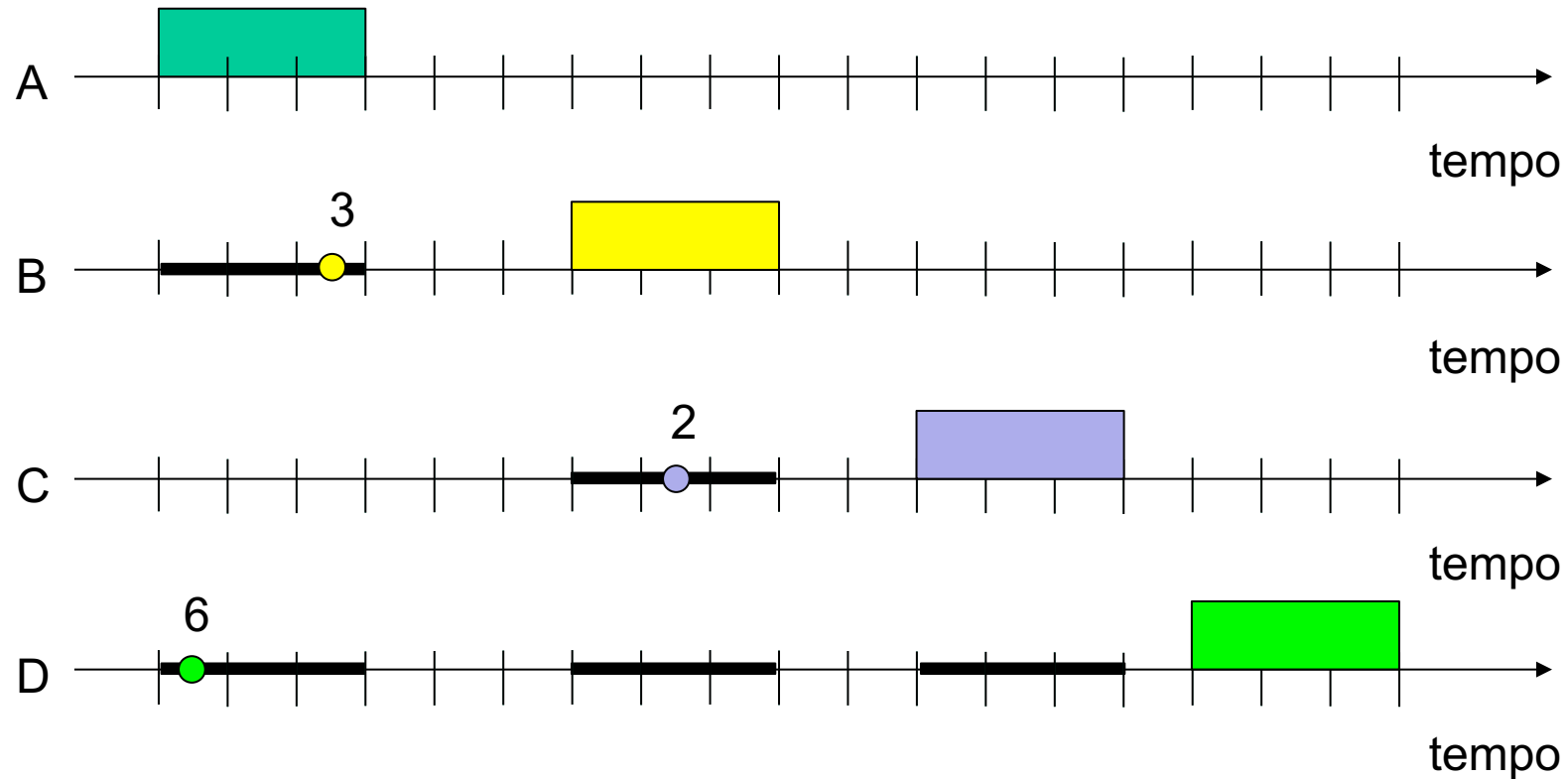
Rede estruturada



Rede ad hoc



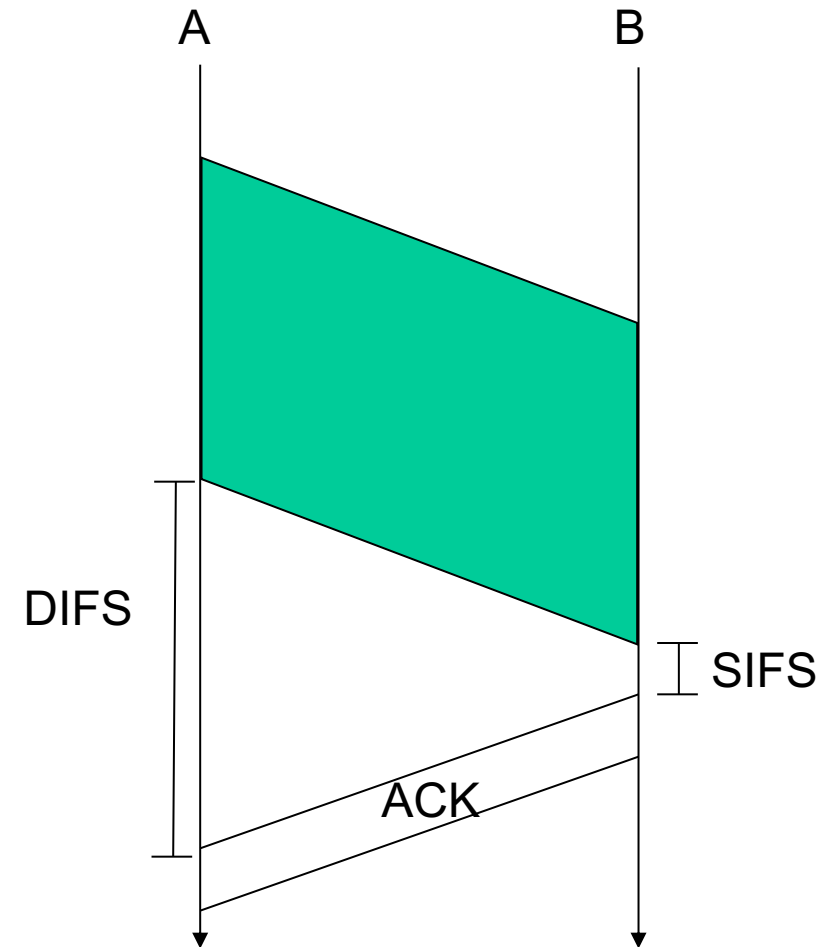
IEEE 802.11: CSMA/CA



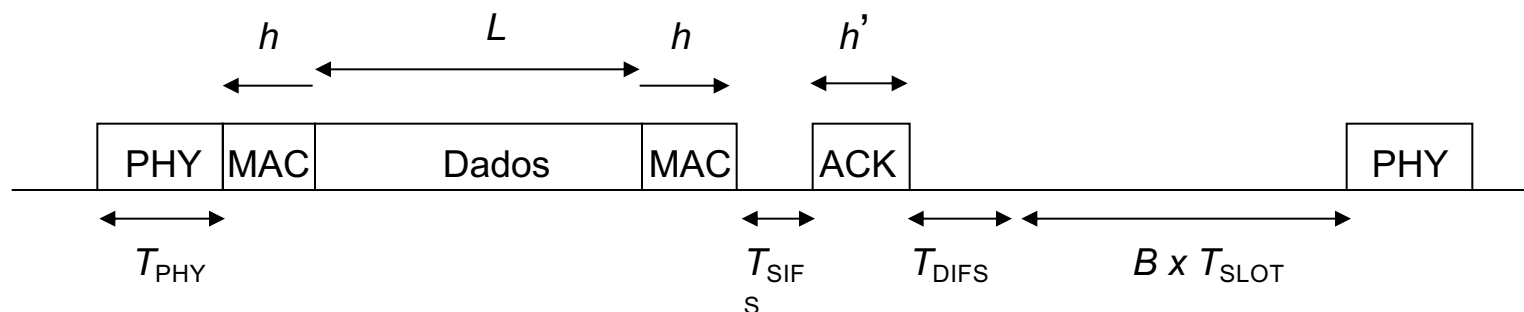
O tempo de recuo só é descontado quando o canal é percebido vazio

IEEE 802.11: prioridade aos ACKs

- ❑ Canal livre durante DIFS
 - Transmite trama
 - Espera pelo ACK
- ❑ Canal ocupado
 - Escolhe aleatoriamente um período de tempo
 - Transmite depois do canal ter estado livre durante esse período de tempo
- ❑ Não receção do ACK
 - Recuo binário exponencial truncado



Desempenho do IEEE 802.11b: CSMA/CA

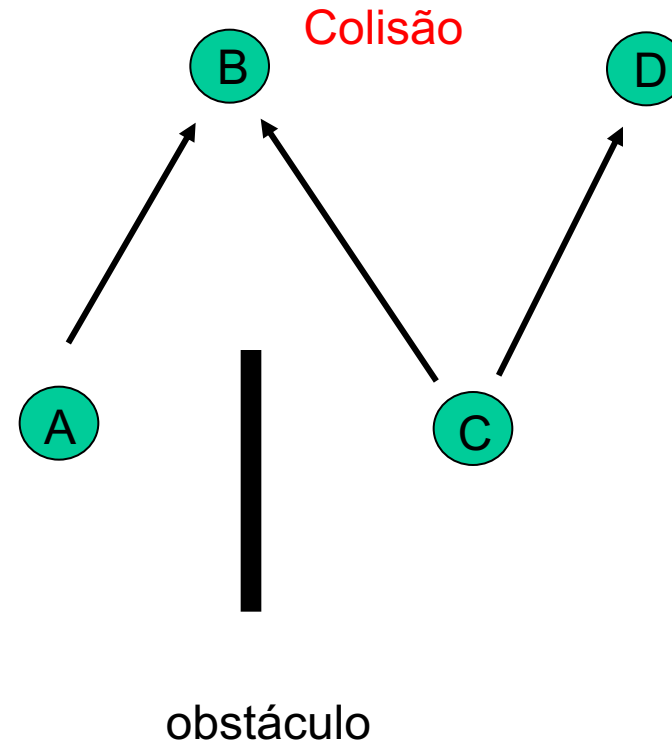


T_{PHY}	192 μs	h	28 B
T_{SIFS}	10 μs	h'	14 B
T_{DIFS}	50 μs	c	11 Mb/s
T_{SLOT}	20 μs	B_{Max}	31

$r = 6.4 \text{ Mb/s (58\%)}$
para $L = 1500 \text{ B}$

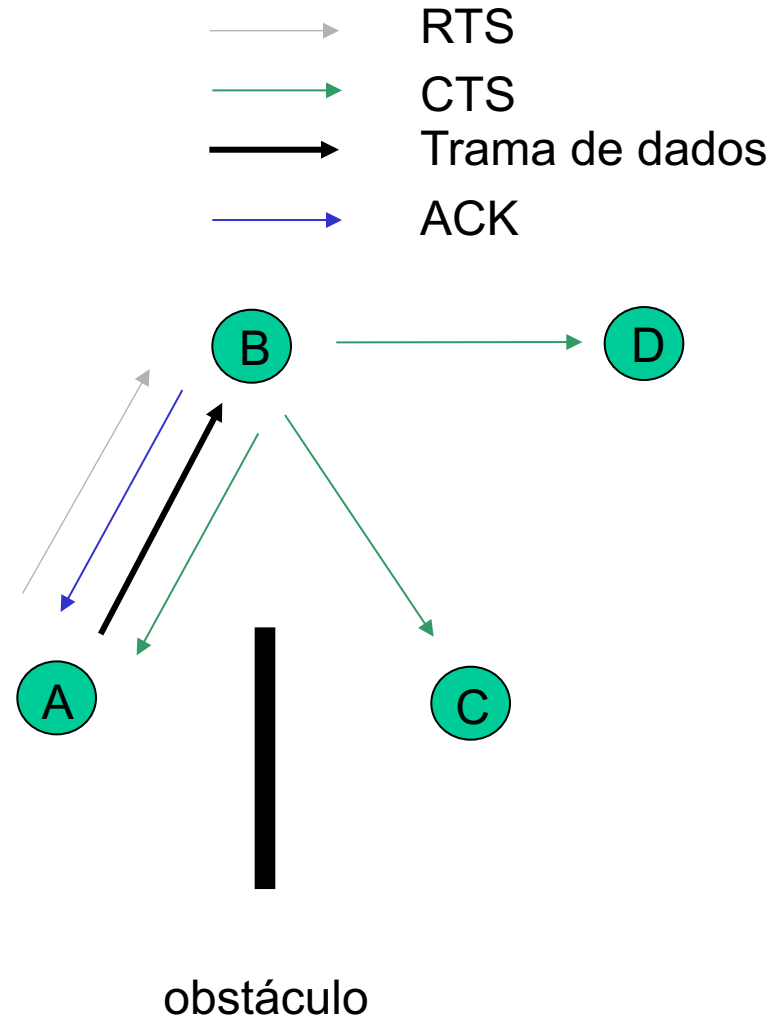
Nós escondidos

- ❑ Nós A e C não se conseguem escutar mutuamente
- ❑ B está ao alcance de A e C
- ❑ Transmissão de A não inibe transmissão de C e vice-versa
- ❑ **CSMA degenera em ALOHA puro!**

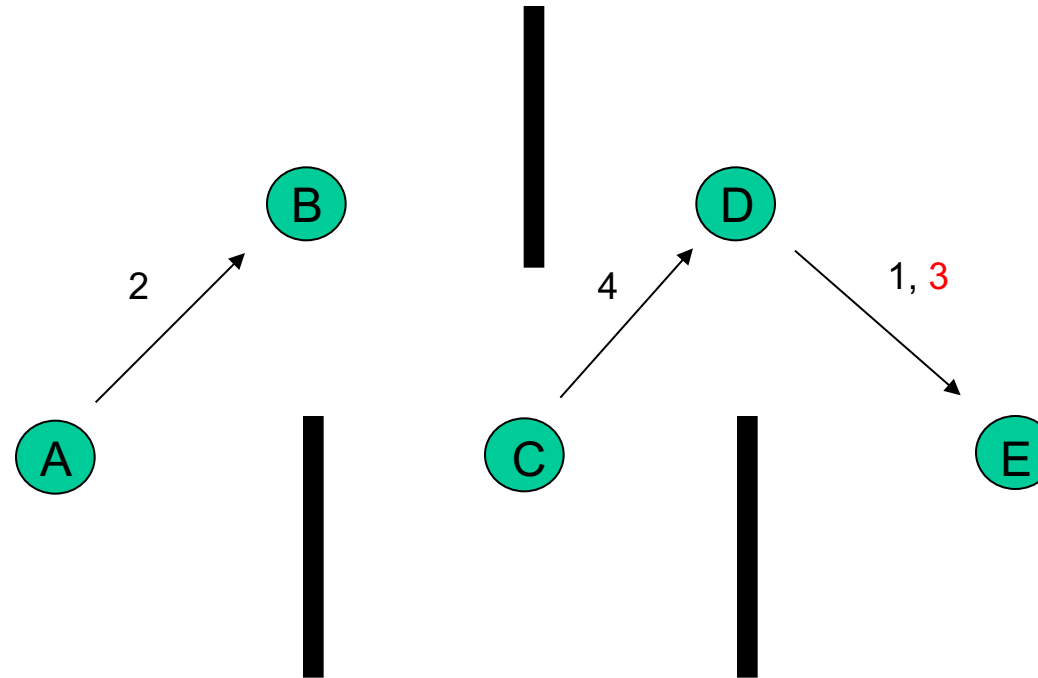


RTS-CTS

- ❑ Mini-trama Request-to-Send
 - Contém tamanho da trama de dados
 - Inibe nós na vizinhança da origem
- ❑ Mini-trama Clear-to-Send
 - Contém tamanho da trama de dados
 - Inibe nós na vizinhança do destino
- ❑ Trama de dados
- ❑ ACK

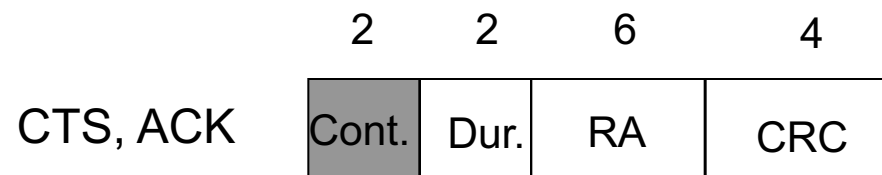
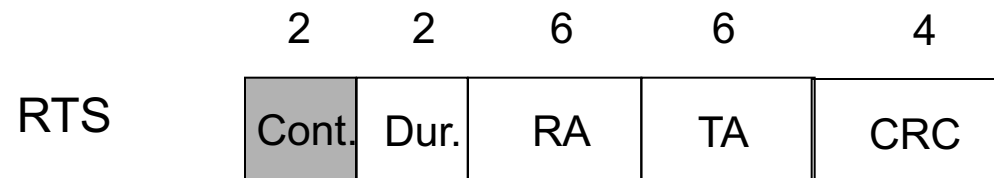
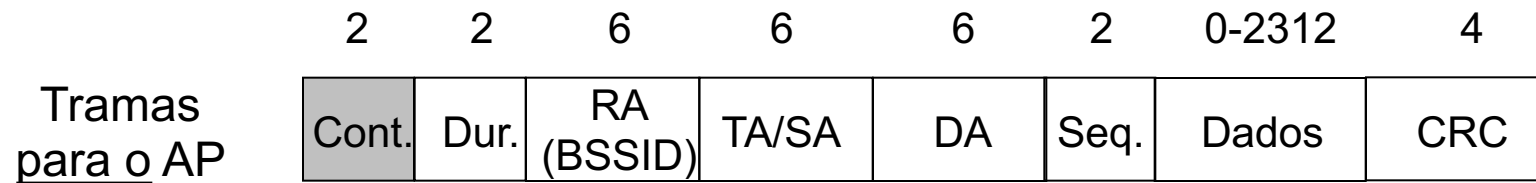
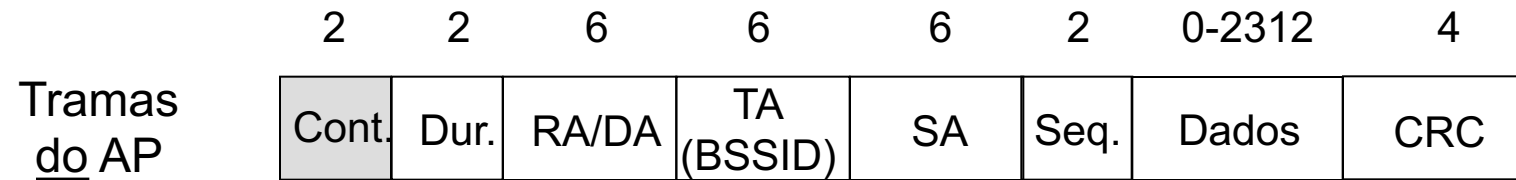


RTS-CTS não é ideal

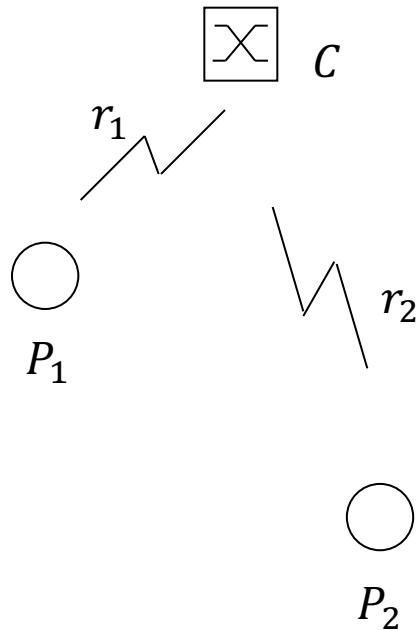


- 1 – D transmite para E
- 2 – A transmite para B; C não consegue ler o CTS de B
- 3 – D pára de transmitir para E; para C o canal está livre
- 4 – C transmite para D, causando uma colisão em B

Anatomia das tramas IEEE 802.11



Adaptação do débito



Volume de tráfego igual para P_1 e P_2

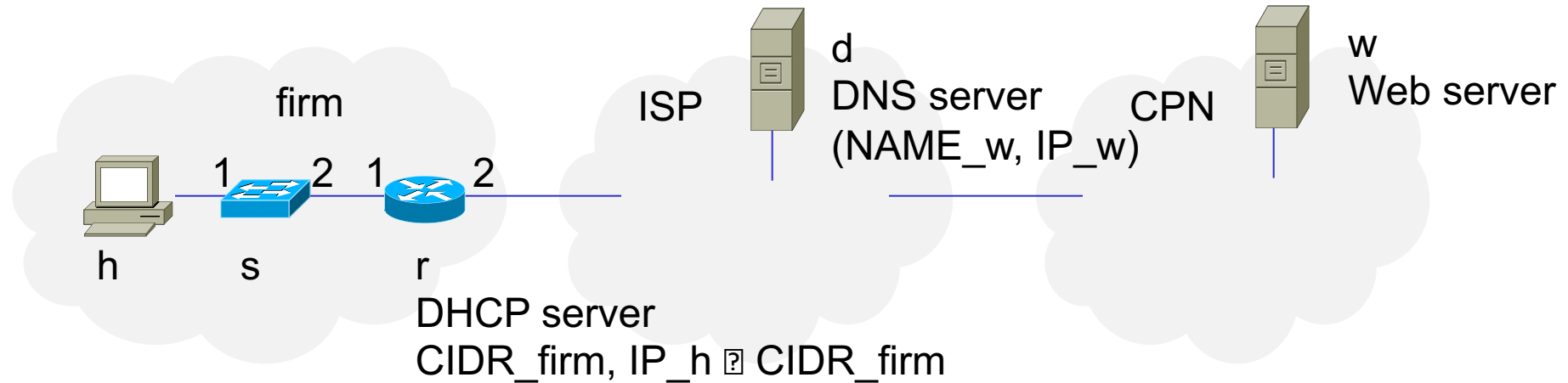
r_1 - débito para P_1

r_2 - débito para P_2

Débito médio, r , corresponde à média harmónica (e não à média aritmética)

$$r = \frac{r_1 \times r_2}{r_1 + r_2}$$

Download of a Web page: DHCP,UDP, IP, and Ethernet



DHCP request message (id)

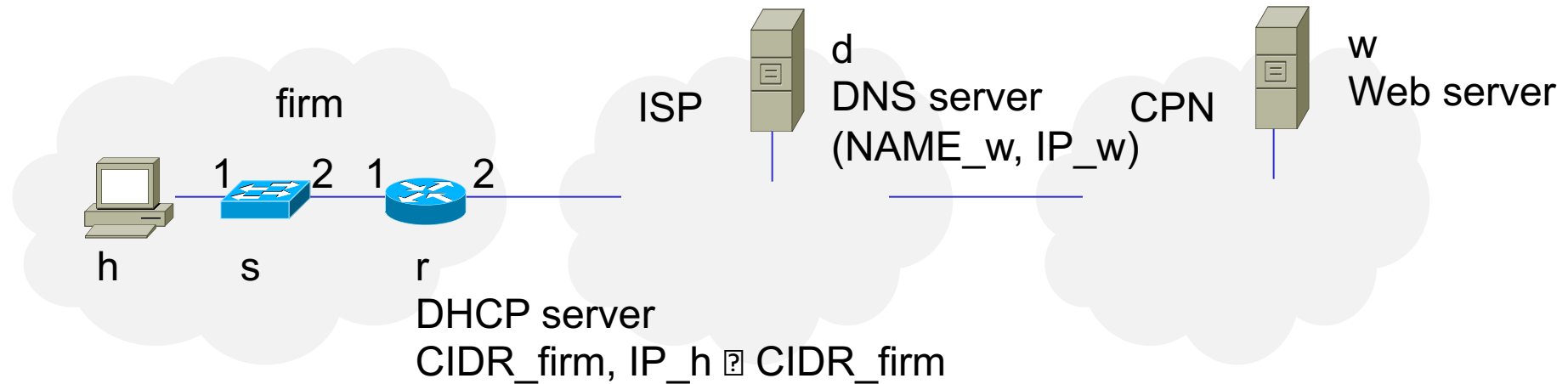
MAC_h : 0.0.0.0 : 68 → FF-FF-FF-FF-FF-FF : 255.255.255.255 : 67

DHCP ACK message (id, IP_h, CIDR_firm, IP_r.1, IP_d)

MAC_r.1 : IP_r.1 : 67 → FF-FF-FF-FF-FF-FF : 255.255.255.255 : 68

1. s learns that MAC_h is on its interface 1 and that MAC_r.1 is on its interface 2
2. h gains an IP address and network mask, and learns a gateway and DNS server

Download of a Web page: ARP



In order to interrogate the DNS, *h* first needs the MAC address of the gateway

ARP request packet (MAC_h, IP_h, ?, IP_r.1)

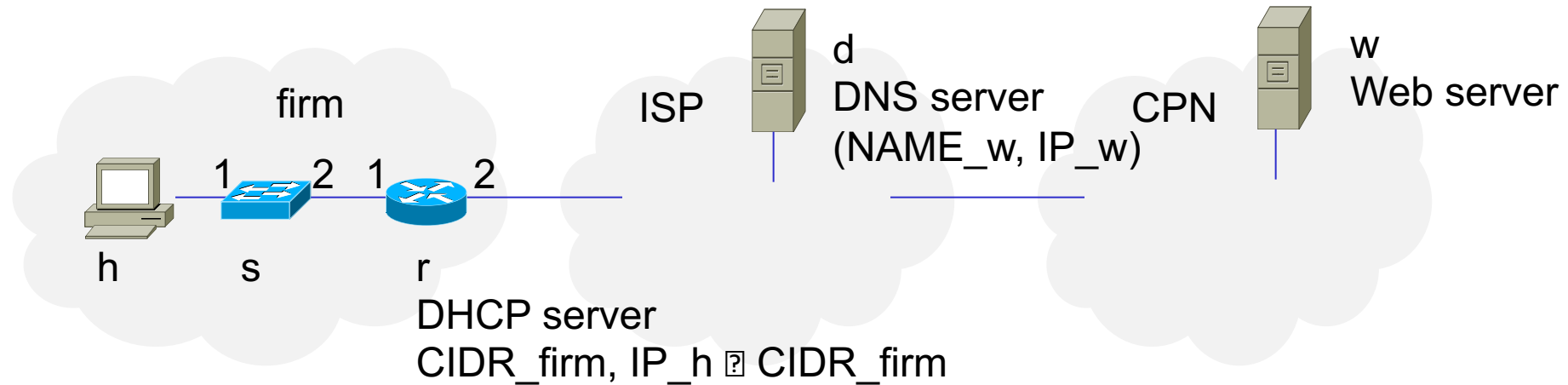
MAC_h → FF-FF-FF-FF-FF-FF

ARP reply packet (MAC_h, IP_h, MAC_r.1, IP_r.1)

MAC_r.1 → MAC_h

h learns the pair (MAC_r.1, IP_r.1) and *r* learns the pair (MAC_h, IP_h)

Download of a Web page: DNS



DNS query message ($\text{NAME_w}, ?$)

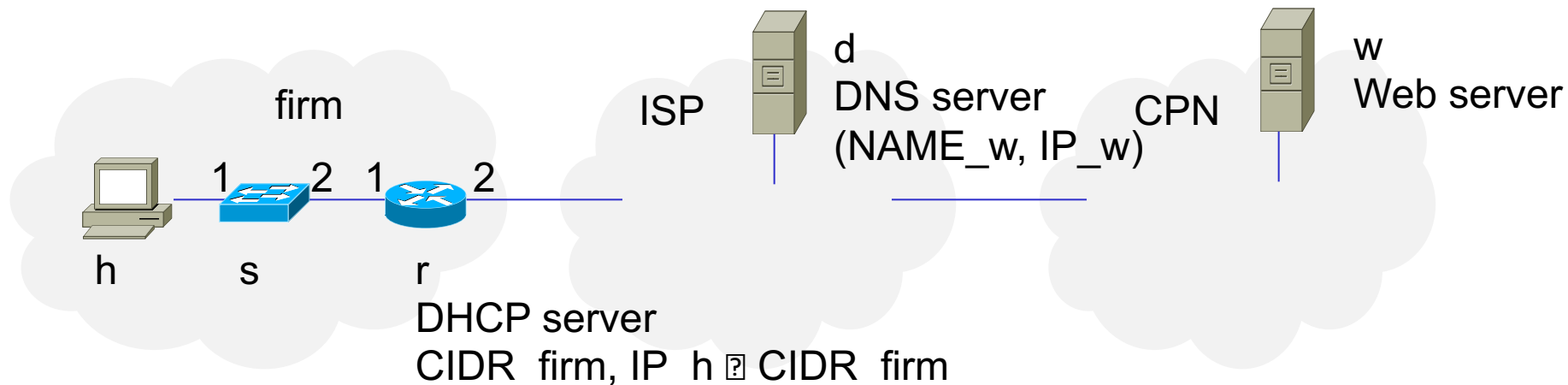
$\text{MAC_h} : \text{IP_h} : \text{EUDP_h} \rightarrow \text{MAC_r.1} : \text{IP_d} : 53$

DNS response message ($\text{NAME_w}, \text{IP_w}$)

$\text{MAC_r.1} : \text{IP_d} : 53 \rightarrow \text{MAC_h} : \text{IP_h} : \text{EUDP_h}$

1. NAME_w was extracted from the URL of the web page
2. It was assumed that the DNS server had pair $(\text{NAME_w}, \text{IP_w})$ stored in cache
3. Datagrams are guided through the ISP by IP forwarding tables populated by an intra-domain routing protocol such as OSPF and RIP

Download of a Web page: TCP



TCP SYN segment

MAC_h : IP_h : ETCP_h → MAC_r.1 : IP_w : 80

TCP SYNACK segment

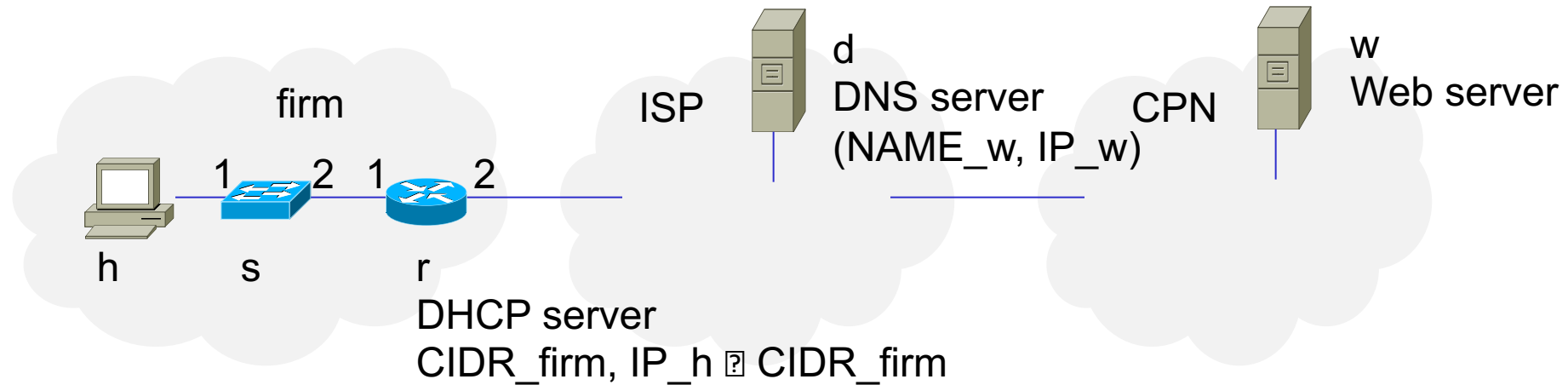
MAC_r.1 : IP_w : 80 → MAC_h : IP_h : ETCP_h

TCP ACK segment

MAC_h : IP_h : ETCP_h → MAC_r.1 : IP_w : 80

1. h and w each creates a socket associated with the quadruple (ETCP_h, IP_h, 80, IP_w)
2. IP forwarding tables populated both by an intra-domain routing protocols and the inter-domain routing protocol, BGP

Download of a Web page: HTTP



HTTP request message (*URL of web page*)

MAC_h : IP_h : ETCP_h → MAC_r.1 : IP_w : 80

HTTP response message (*contents of web page*)

MAC_r.1 : IP_w : 80 → MAC_h : IP_h : ETCP_h

1. Transfer of data is error free
2. Sooner or later each of *h* and *w* closes its side of the connection with a TCP FIN segment