

# **Redes de Computadores**

## **Camada de Enlace**

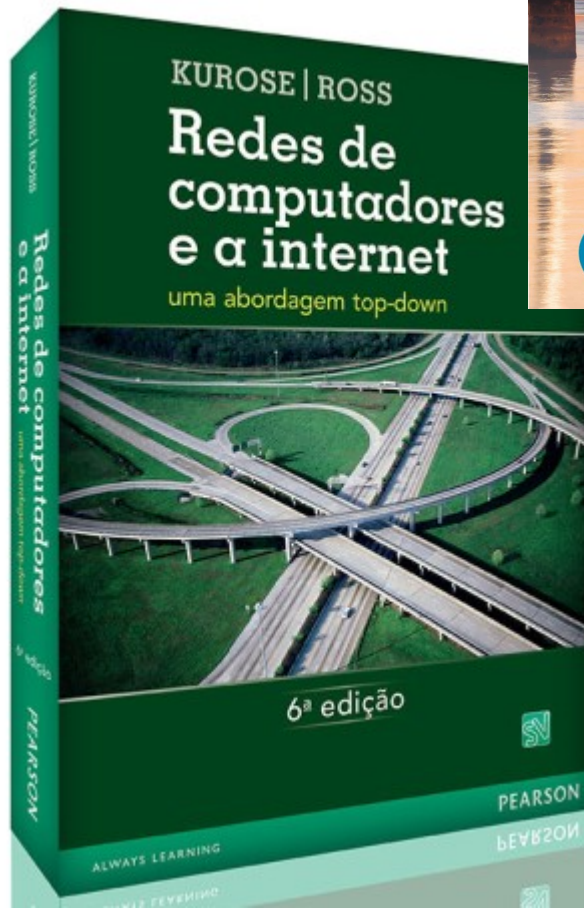
Professor: Fábio Renato de Almeida

<https://github.com/fabiorenatodealmeida>

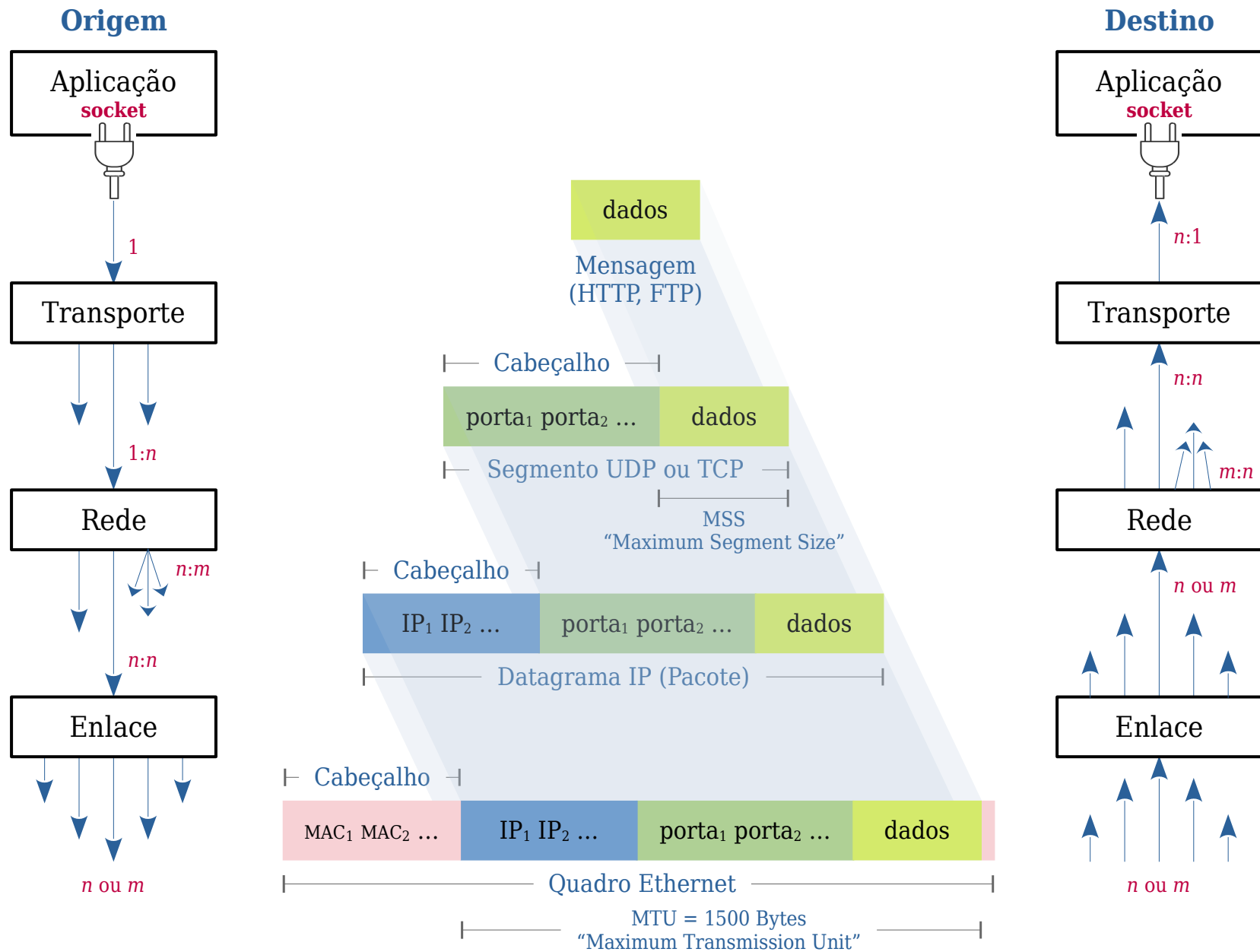
e-mail: [fabiorenatodealmeida@hotmail.com](mailto:fabiorenatodealmeida@hotmail.com)

# Bibliografia

[https://media.pearsoncmg.com/ph/esm/ecs\\_kurose\\_compnetwork\\_8/cw/](https://media.pearsoncmg.com/ph/esm/ecs_kurose_compnetwork_8/cw/)  
<https://www.youtube.com/@JimKurose>



# Pilha de Protocolos



# Enlaces de comunicação

## Meio compartilhado

Enlace de comunicação por difusão: **broadcast**. Necessário um protocolo de controle de acesso ao meio para coordenar a transmissão de quadros.

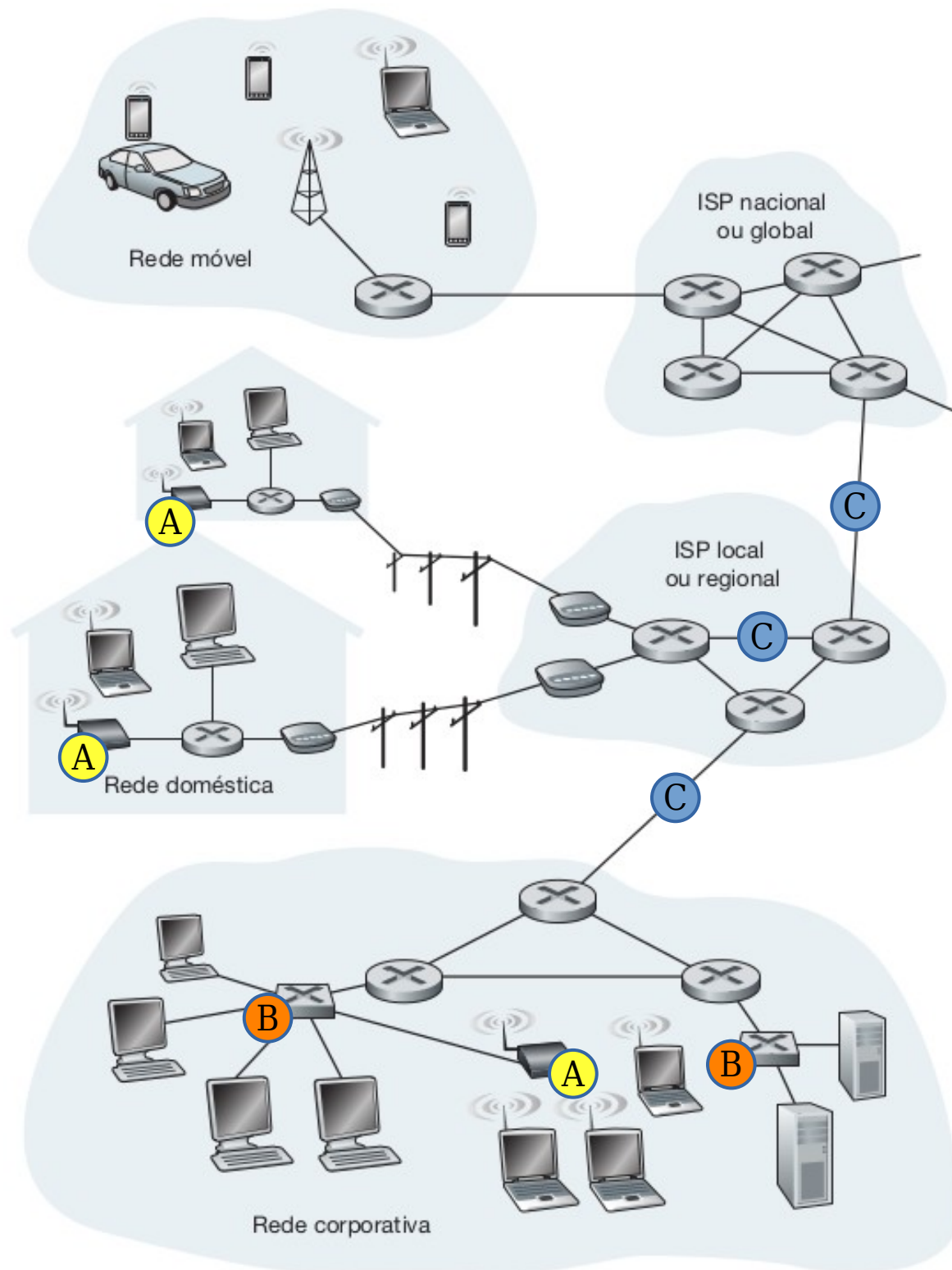
**A** Protocolo Wi-Fi

## Meio dedicado

Enlace de comunicação ponto a ponto.

**B** Protocolo Ethernet

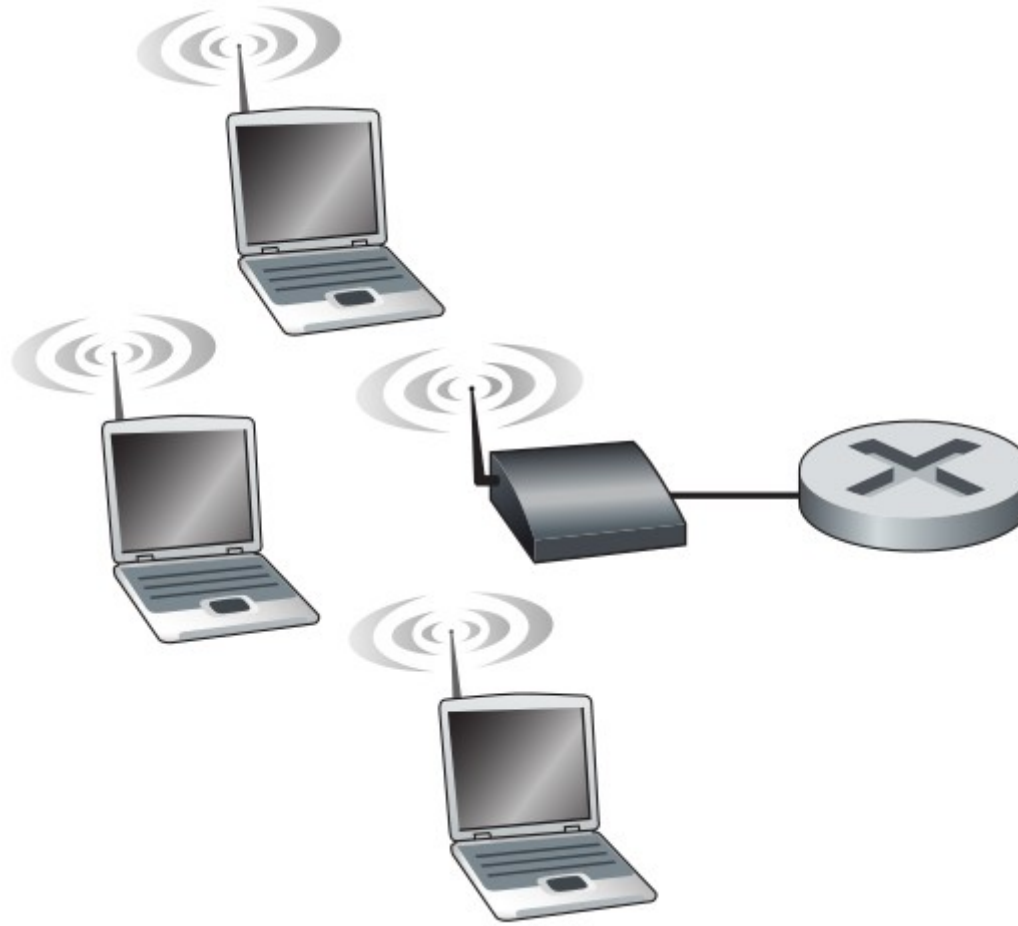
**C** Point-to-Point Protocol (PPP)



# Serviços tipicamente oferecidos pela camada de enlace

- Enquadramento do datagrama.
- Protocolo de controle de acesso ao meio: Em enlaces ponto a ponto o controle de acesso ao meio é simples ou até mesmo inexistente.
- Entrega confiável: Muito usado por enlaces que costumam ter altas taxas de erros, como é o caso de um enlace sem fio – Utiliza ACKs e retransmissão de quadros de modo a não sobrecarregar camadas superiores. Protocolos de camada de enlace com fio não costumam oferecer entrega confiável devido a baixa taxa de erros de transmissão.
- Detecção e correção de erros. São adicionados bits de detecção e correção de erros – EDC (Error Detection-and-Correction).
  - ✓ Paridade de bits.
  - ✓ Soma de verificação (usada na camada de transporte e no IPv4).
  - ✓ Verificação de redundância cíclica (usada na camada de enlace).

# Protocolos de controle de acesso ao meio



“De quem é a vez de falar?”

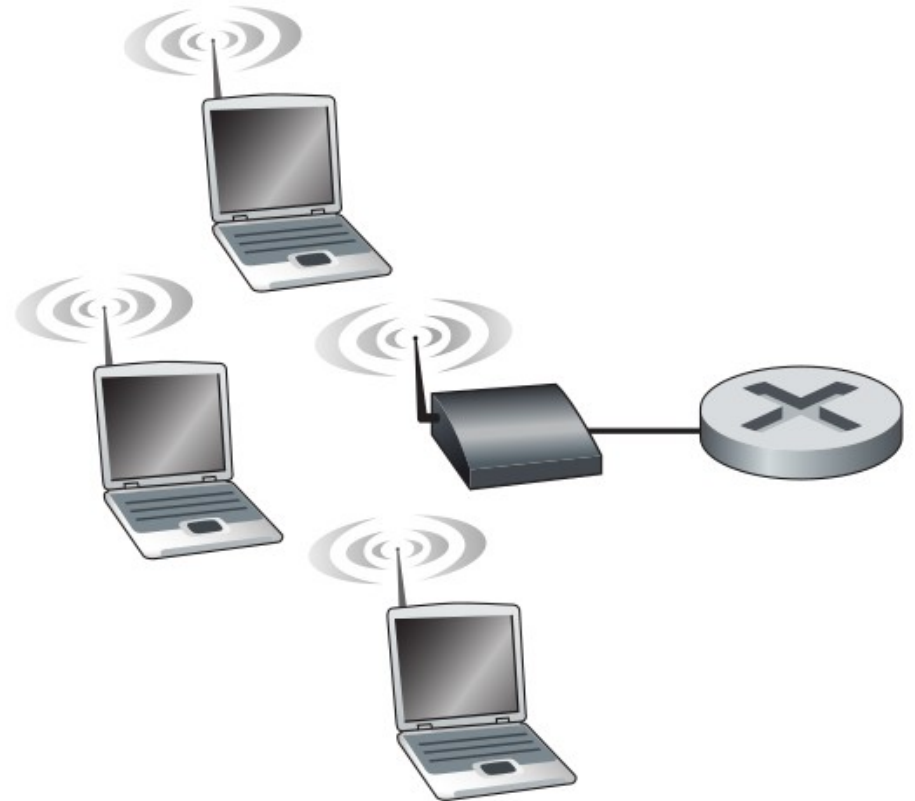
**COLISÃO** → Largura de banda desperdiçada

# Protocolos de controle de acesso ao meio

Como evitar/reduzir colisões?

Técnicas...

1. Protocolos de divisão de canal
2. Protocolos de acesso aleatório
3. Protocolos de revezamento



# Protocolos de controle de acesso ao meio

## 1. Protocolos de divisão de canal

**Multiplexação por divisão de tempo:** Sempre que um nó tiver algo para enviar, este envia no compartimento de tempo reservado a ele. Elimina colisões e é perfeitamente justo, mas (1) limita a taxa de transmissão a fatia temporal reservada ao nó e (2) o nó sempre deve esperar sua vez, mesmo que os outros nós não tenham nada a transmitir.

**Multiplexação por divisão de frequência:** Sempre que um nó tiver algo para enviar, este envia na frequência reservada a ele. Elimina colisões e é perfeitamente justo, mas também limita a taxa de transmissão em virtude do canal de comunicação suportar frequências diferentes.

**Acesso múltiplo por divisão de código - CDMA (Code Division Multiple Access):** Atribui um código diferente a cada nó, o qual é utilizado para codificar os bits de dados a serem transmitidos. Permite transmissão simultânea mesmo com interferências.



# Protocolos de controle de acesso ao meio

## 2. Protocolos de acesso aleatório

**CSMA – Carrier Sense Multiple Access:** Acesso múltiplo com detecção de portadora. Respeito ao portador atual do sinal → “Ouça antes de falar”. Utiliza largura de banda total do canal nas transmissões.

**CSMA/CD (Collision Detection):** CSMA com detecção de colisão – Se houver colisão, pare e espere por um tempo aleatório (possivelmente um recuo exponencial), então tente novamente se o canal não estiver ocupado.

Exemplo: **Protocolo Ethernet.**

# Protocolos de controle de acesso ao meio

## 3. Protocolos de revezamento

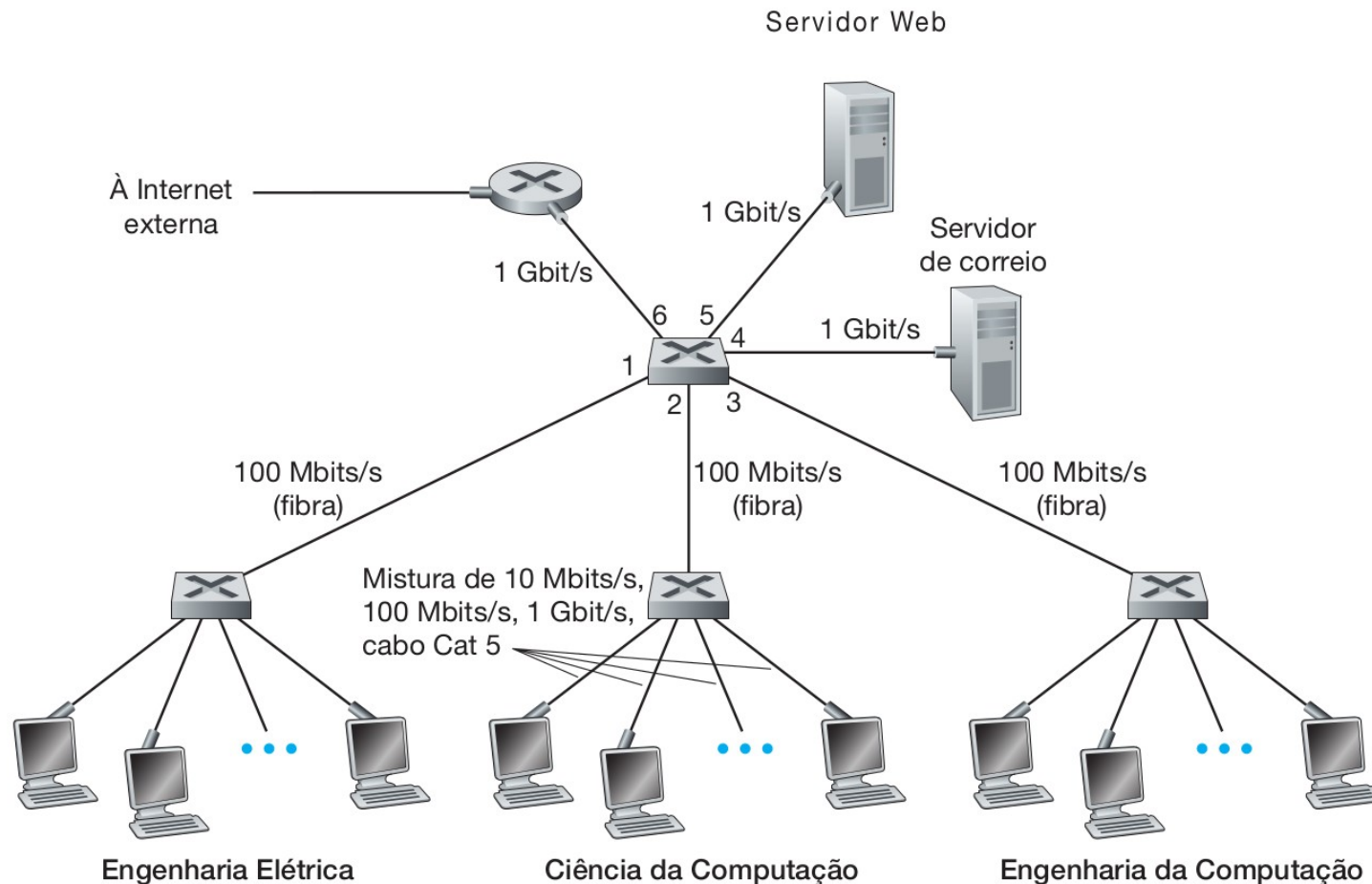
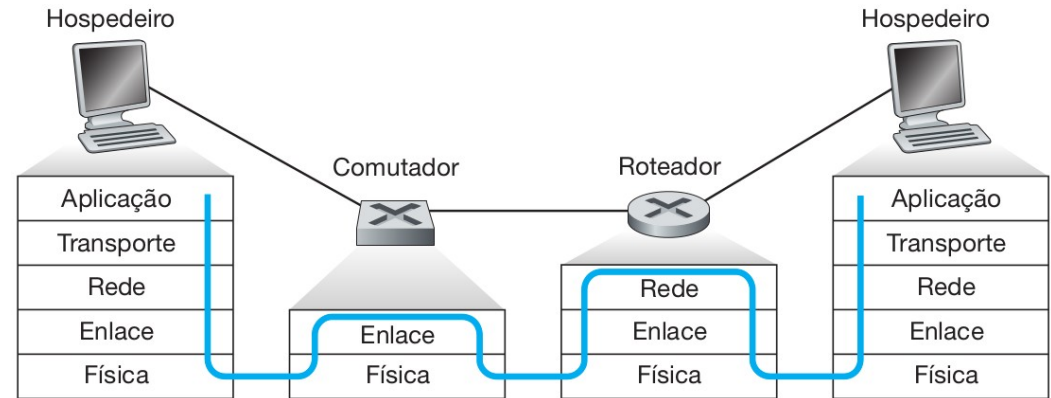
**Polling (Seleção):** Requer que um dos hospedeiros seja designado como nó mestre. O nó mestre seleciona cada um dos nós por alternância circular e envia permissão para transmitir até um certo número máximo de quadros. Elimina colisões mas introduz um atraso de seleção durante a alternância circular.  
Exemplo: **Protocolo Bluetooth.**

**Passagem de token:** Um quadro especial é passado entre os nós segundo uma ordem específica. O protocolo atua de modo descentralizado e possui alta eficiência, mas a falha de um nó pode derrubar o canal inteiro.

# Comutação de pacotes em LANs

## Switches...

- Operam na camada de enlace
- Comutam quadros (não datagramas)
- Não reconhecem endereços IP
- Usam endereços MAC

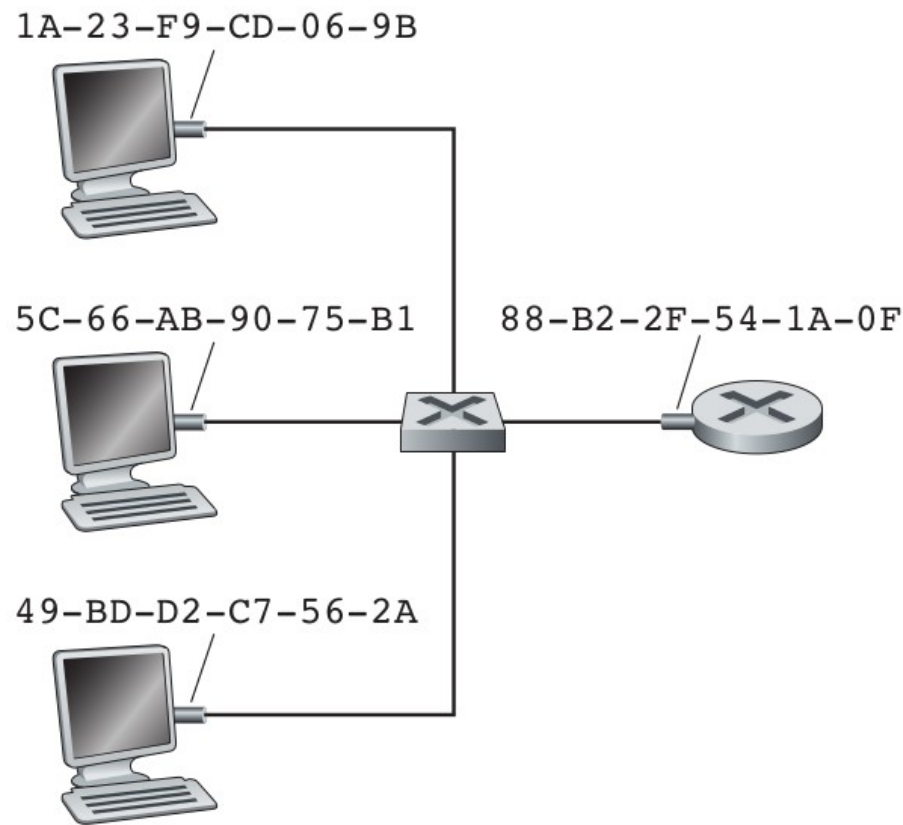


# Endereço MAC - Media Access Control

Endereço físico da placa de rede: 48 bits

Hoje é possível mudar o endereço MAC de uma interface de rede via software

- 24 bits: Atribuído ao fabricante da placa de rede pela IEEE
- 24 bits: ID local gerenciado pelo próprio fabricante



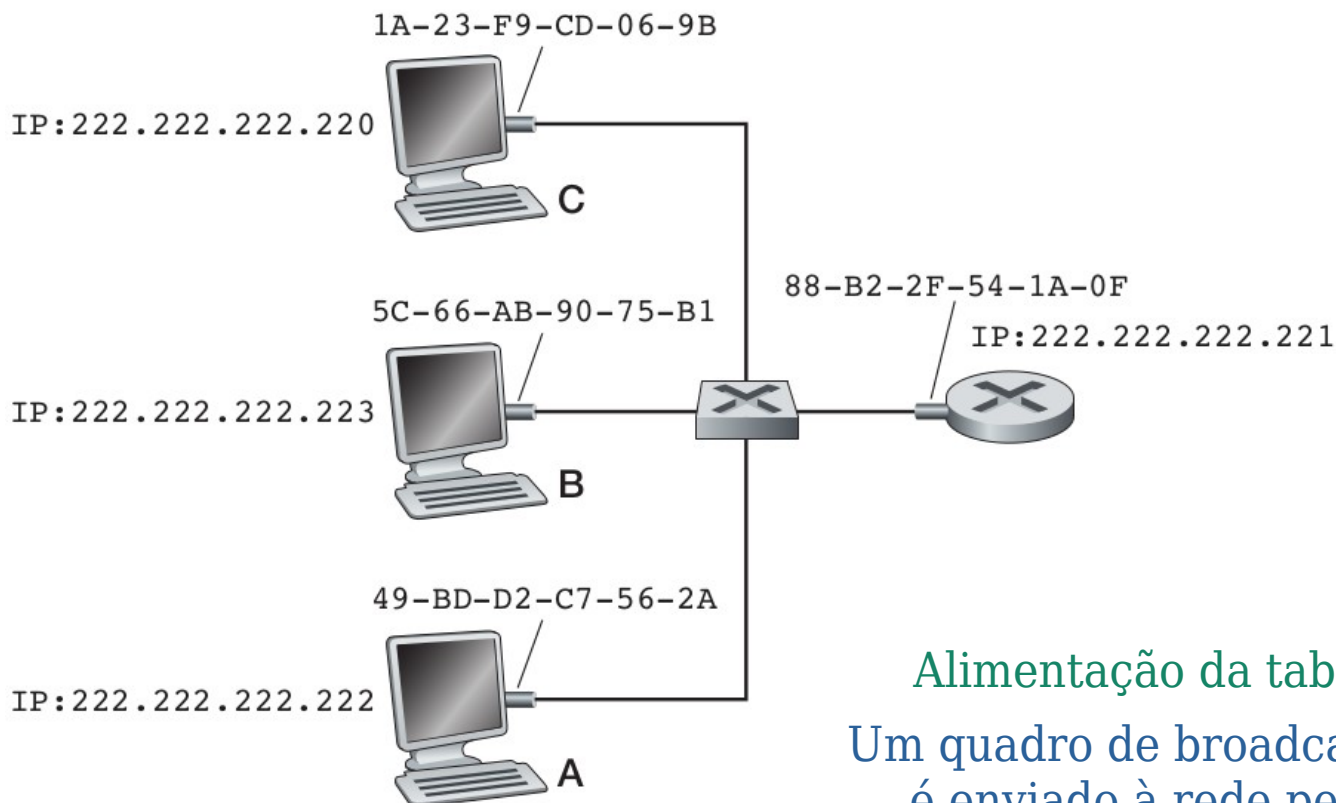
Endereço MAC de broadcast: FF-FF-FF-FF-FF-FF

# ARP - Address Resolution Protocol

## Tabela ARP no hospedeiro C

Endereço IP	Endereço MAC	TTL
222.222.222.221	88-B2-2F-54-1A-0F	13:45:00
222.222.222.223	5C-66-AB-90-75-B1	13:52:00

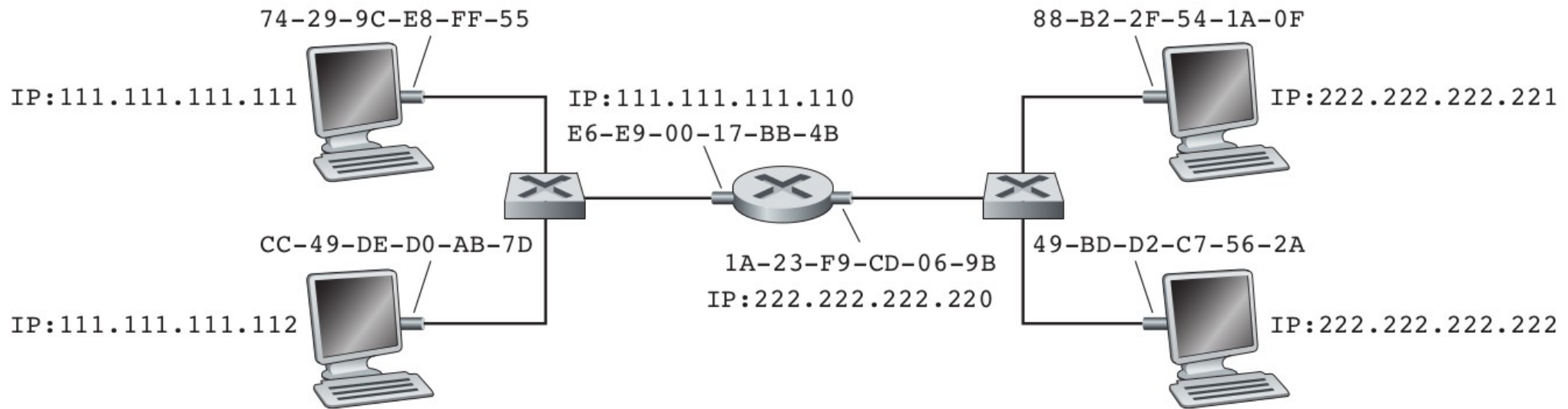
Tipicamente 20  
minutos



Alimentação da tabela ARP em um nó emissor  
Um quadro de broadcast (contendo um pacote ARP)  
é enviado à rede pelo nó emissor pedindo pelo  
endereço MAC do nó destino.

# ARP em ação...

Enviando um datagrama de uma sub-rede à outra:



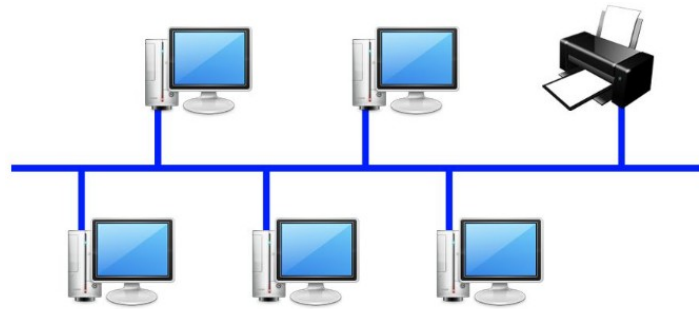
Como um datagrama é enviado da máquina com IP 111.111.111.111 até a máquina com IP 222.222.222.222

?

# LANs Ethernet

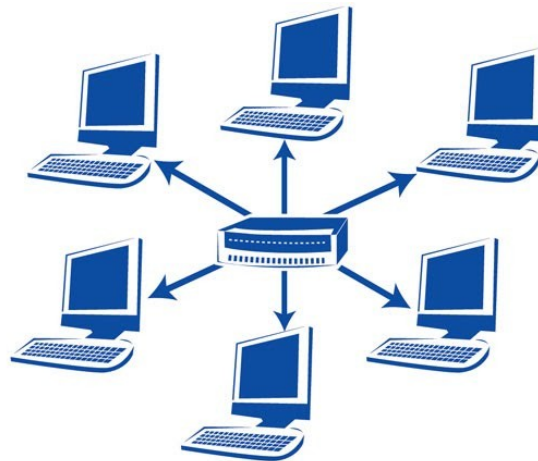
## Topologia de barramento

LAN por difusão: CSMA/CD



## Topologia de estrela

LAN por difusão (Hub - camada física) ou comutada (Switch - camada de enlace)



# Quadro Ethernet



**Preâmbulo (8 bytes):** Utilizado para sincronizar o relógio do adaptador de rede receptor com o relógio do adaptador emissor.

Bytes de 1 a 7 = 10101010

Byte 8 = 10101011

**Endereços de destino e origem (6 bytes cada):** Endereços MAC.

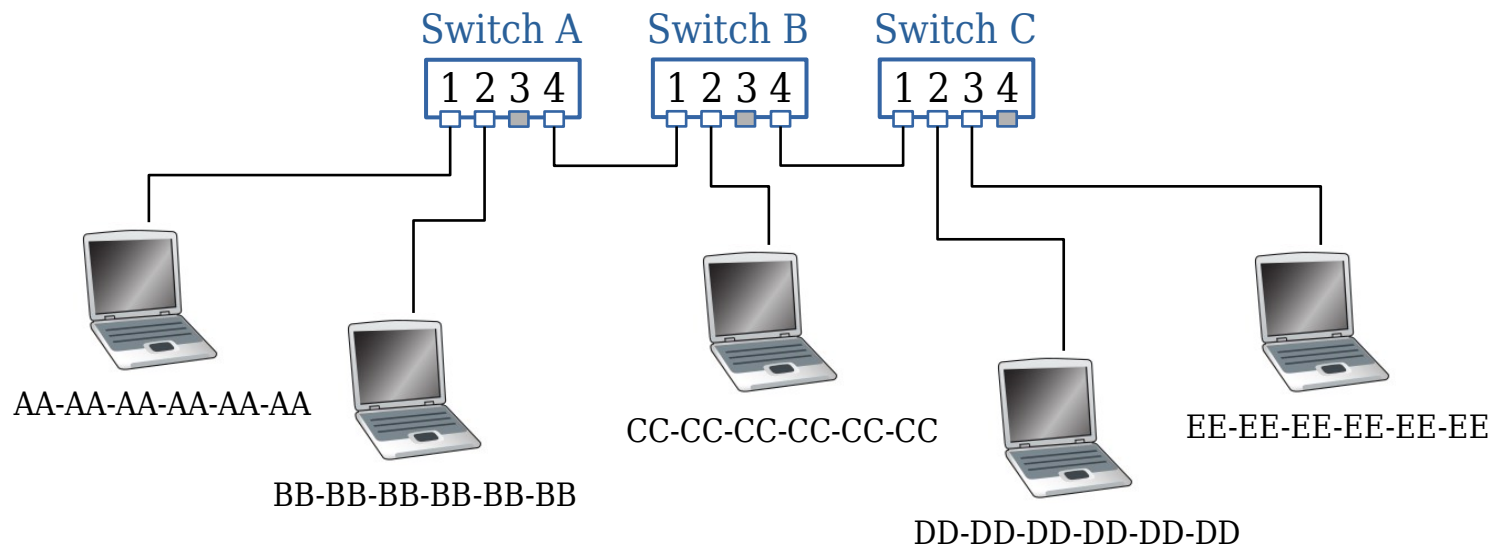
**Tipo (2 bytes):** IP, ARP (0x0806), etc.

**Dados (46..1500 bytes):** Carga útil (payload).

**CRC (4 bytes):** Utilizado na detecção e correção de erros de transmissão.



# Comutação na camada de enlace



**Switch A - Tabela de Comutação**

MAC	Interface
AA-AA-AA-AA-AA-AA	1
BB-BB-BB-BB-BB-BB	2
CC-CC-CC-CC-CC-CC	4
DD-DD-DD-DD-DD-DD	4
EE-EE-EE-EE-EE-EE	4

**Switch B - Tabela de Comutação**

MAC	Interface
AA-AA-AA-AA-AA-AA	1
BB-BB-BB-BB-BB-BB	1
CC-CC-CC-CC-CC-CC	2
DD-DD-DD-DD-DD-DD	4
EE-EE-EE-EE-EE-EE	4

**Switch C - Tabela de Comutação**

MAC	Interface
AA-AA-AA-AA-AA-AA	1
BB-BB-BB-BB-BB-BB	1
CC-CC-CC-CC-CC-CC	1
DD-DD-DD-DD-DD-DD	2
EE-EE-EE-EE-EE-EE	3

## Propriedades:

- Autoaprendizagem
- Sem colisões
- Enlaces heterogêneos

Interfaces de saída tem buffer.

Um horário de entrada na tabela é mantido para cada registro MAC.

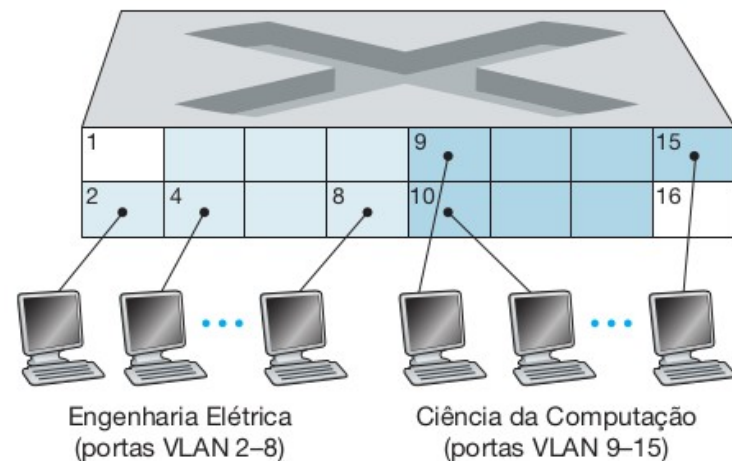
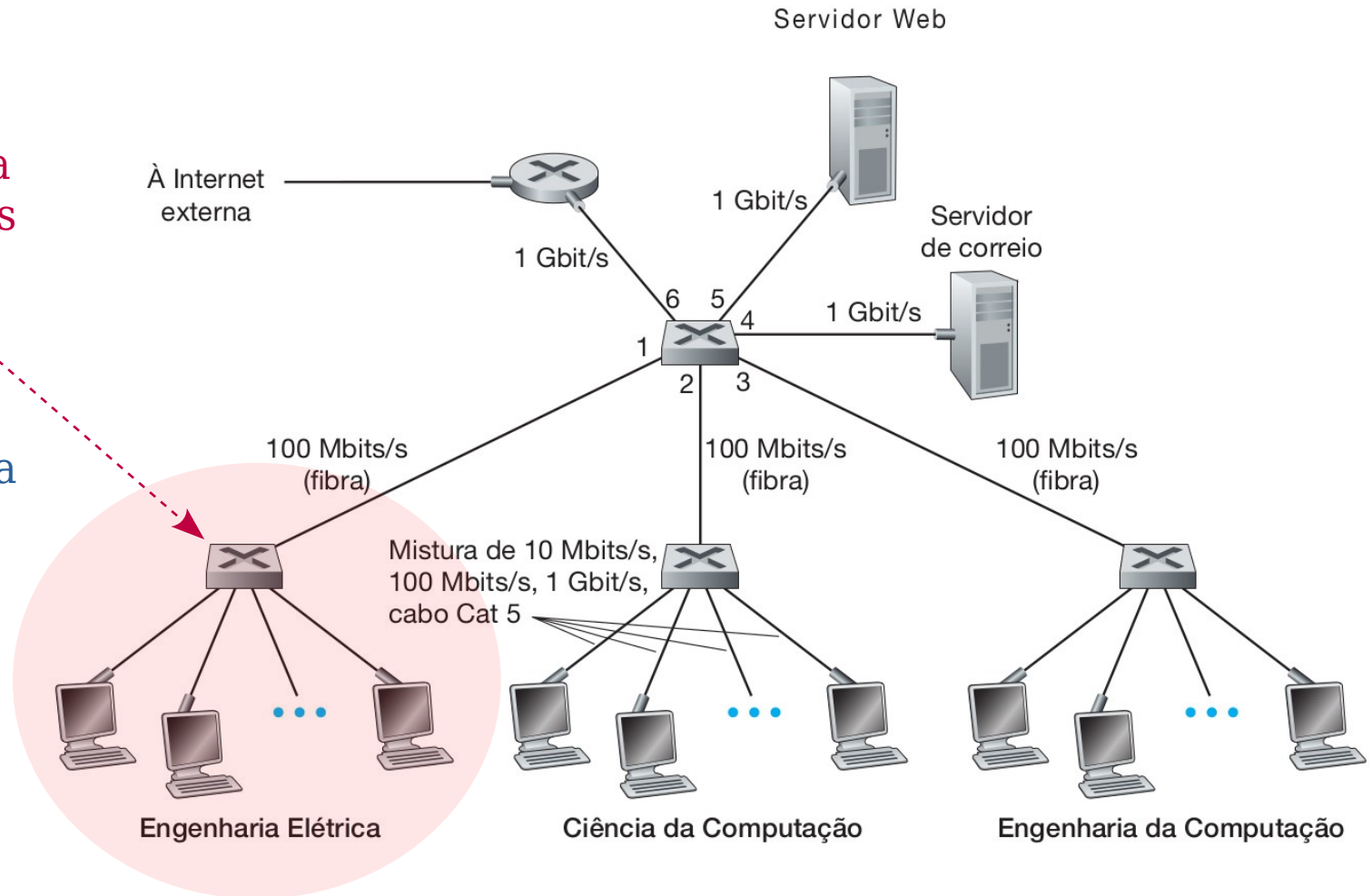
Se não houver uma entrada na tabela para um endereço de destino, o comutador transmite o quadro por difusão.

# VLANs

O comutador concentra o tráfego no grupo, mas não isola o tráfego de difusão: broadcast.

Um roteador no topo da hierarquia resolve o problema, mas atua na camada 3.

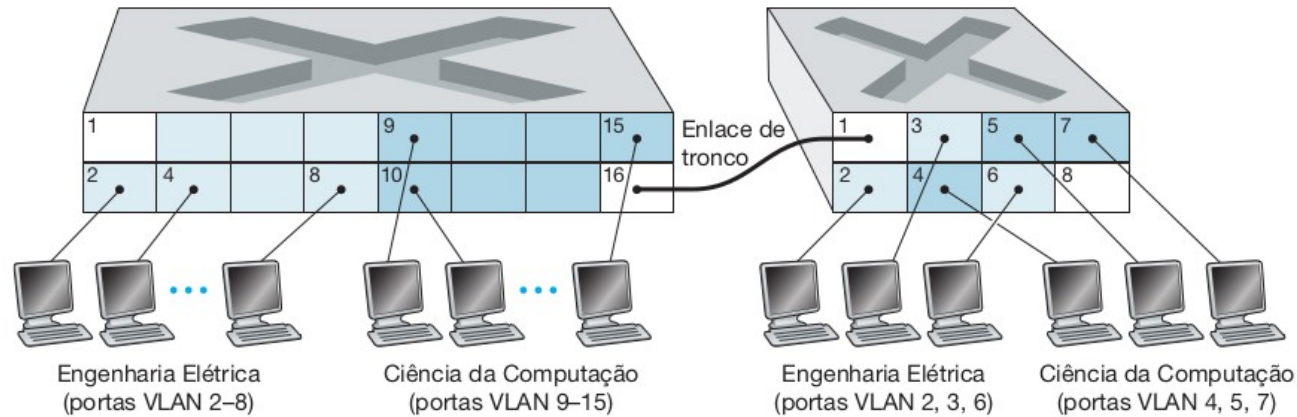
VLANs atuam na camada 2.



Uma VLAN possibilita a implementação de diversas redes locais (virtuais) sobre uma única estrutura de LAN física.

Cada rede local virtual (VLAN) representa um domínio de difusão, uma sub-rede isolada.

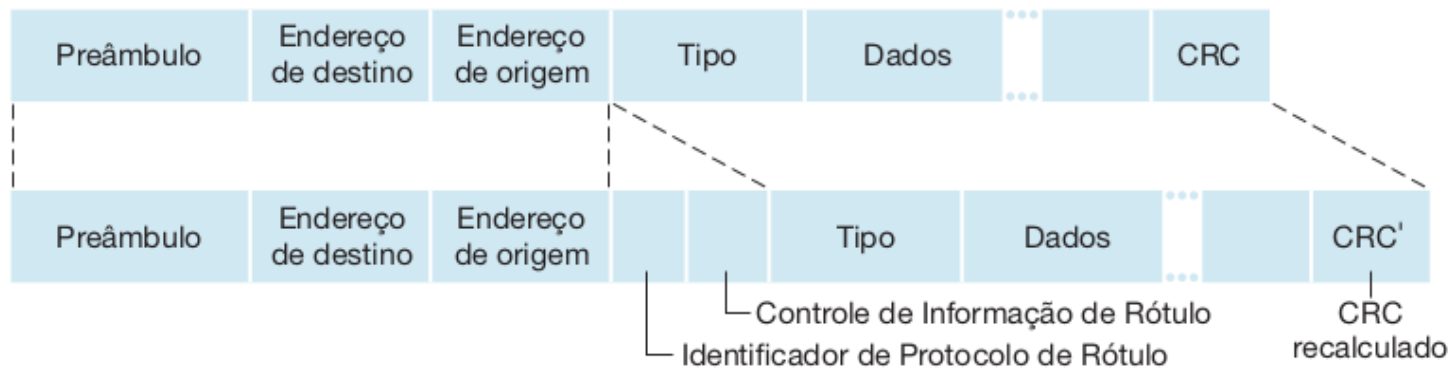
# Entroncamento de VLANs



A porta de tronco pertence a todas as VLANs.

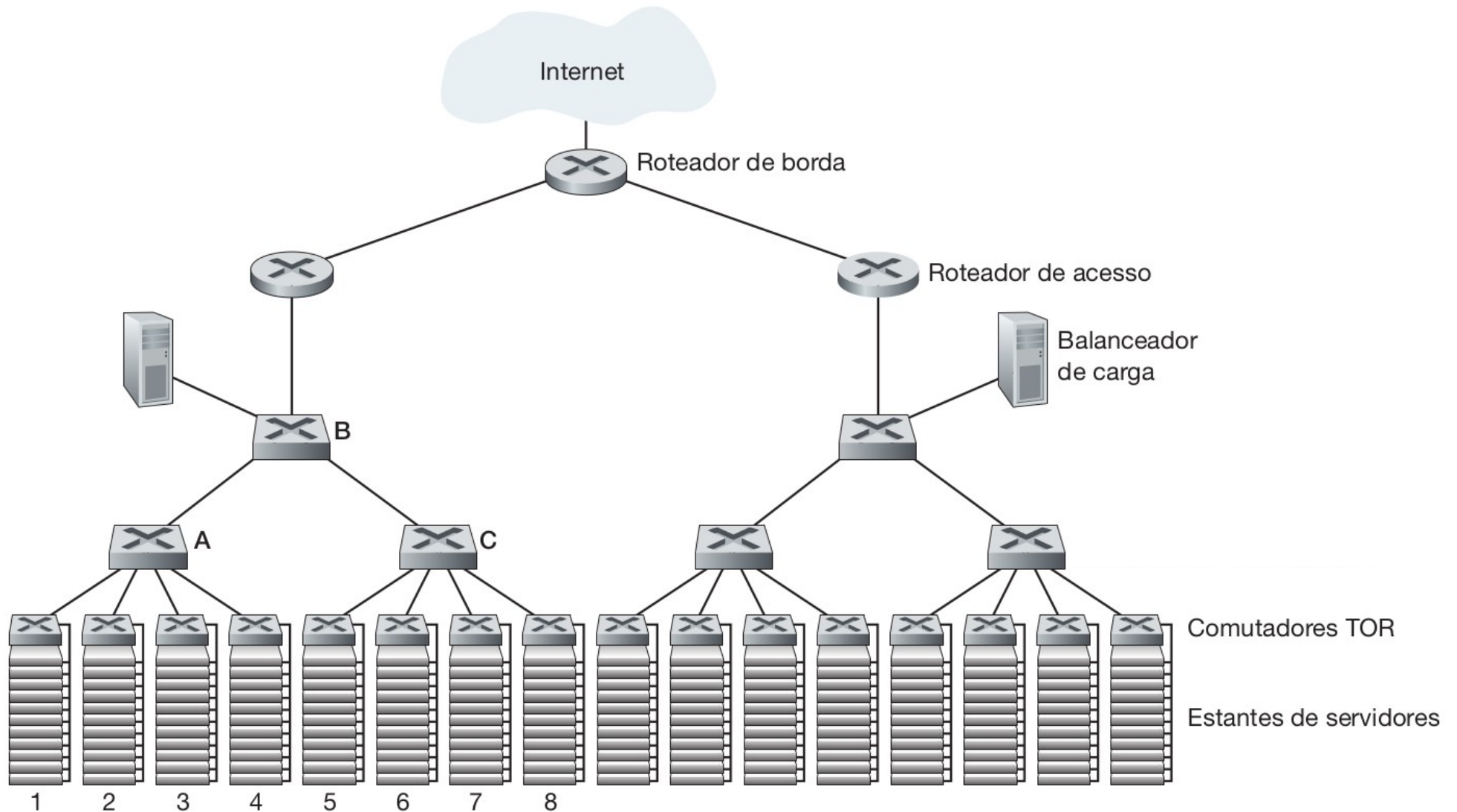
Quadros enviados a qualquer VLAN são encaminhados pelo enlace de tronco ao outro comutador.

Quadros atravessando um tronco VLAN possuem um formato de quadro estendido.



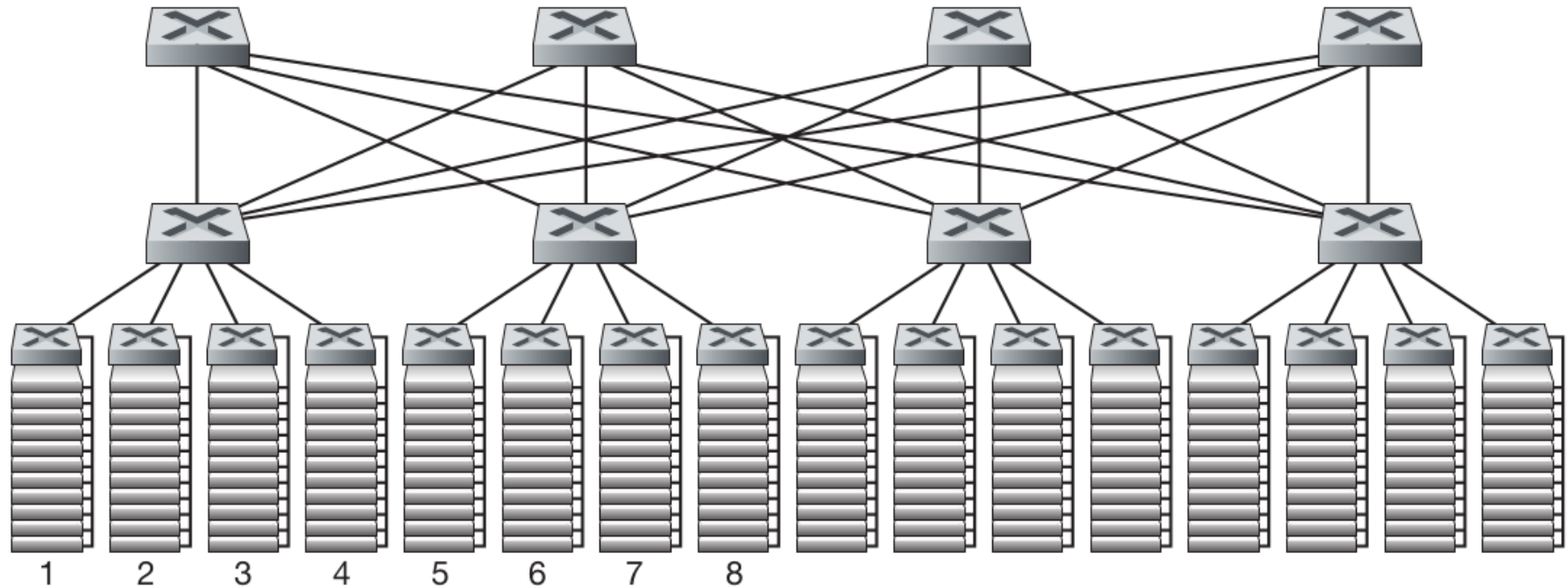
O rótulo (**tag**) da VLAN é adicionado ao quadro pelo comutador no lado de envio e removido pelo comutador no lado de recebimento.

# Datacenter com topologia de rede hierárquica



TOR: Top of Rack

# Datacenter com topologia de rede totalmente conectada

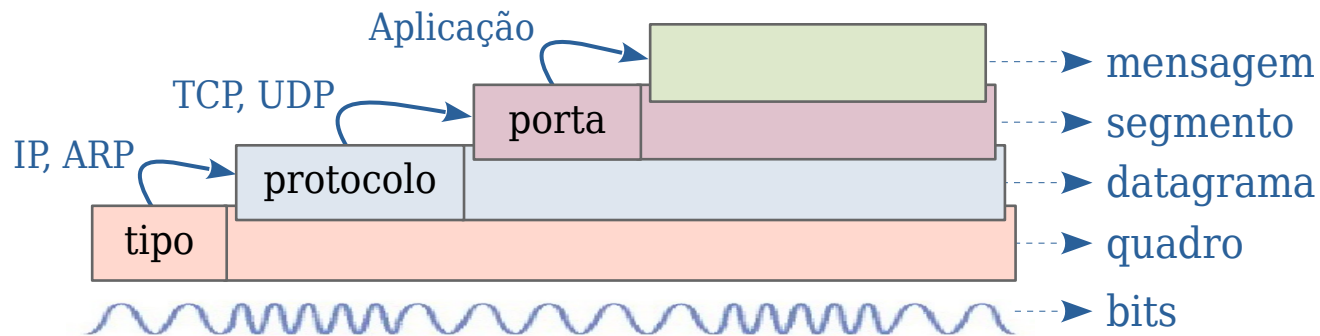


## Algoritmos de roteamento entre comutadores...

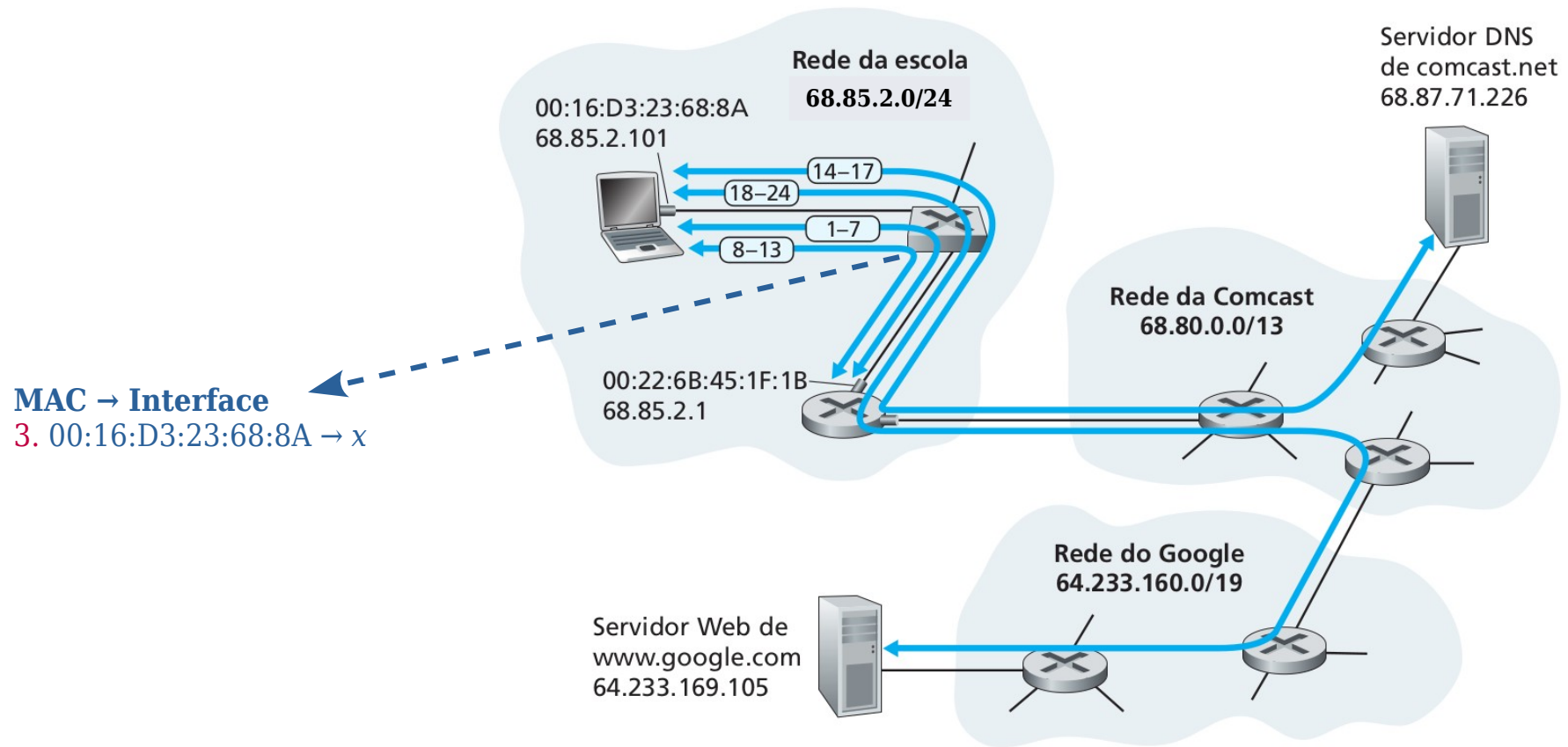
Roteamento aleatório, ou utilizar duas ou mais placas de rede nos hospedeiros e conectá-las a comutadores diferentes e permitir que os próprios hospedeiros direcionem o tráfego de modo inteligente entre os comutadores.

# Protocolos por camada

Aplicação	HTTP, HTTPS (HTTP + SSL/TLS), DHCP, DNS, SMTP, POP3, IMAP, NFS, FTP, SSH
Transporte	TCP, UDP
Rede	IP, ICMP, IGMP, OSPF, RIP, BGP, NAT, ARP, IPsec
Enlace	Ethernet, FDDI, Wi-Fi, PPP, VLAN, ATM
Física	Ethernet 100BASE-T / 100BASE-FX, Wi-Fi



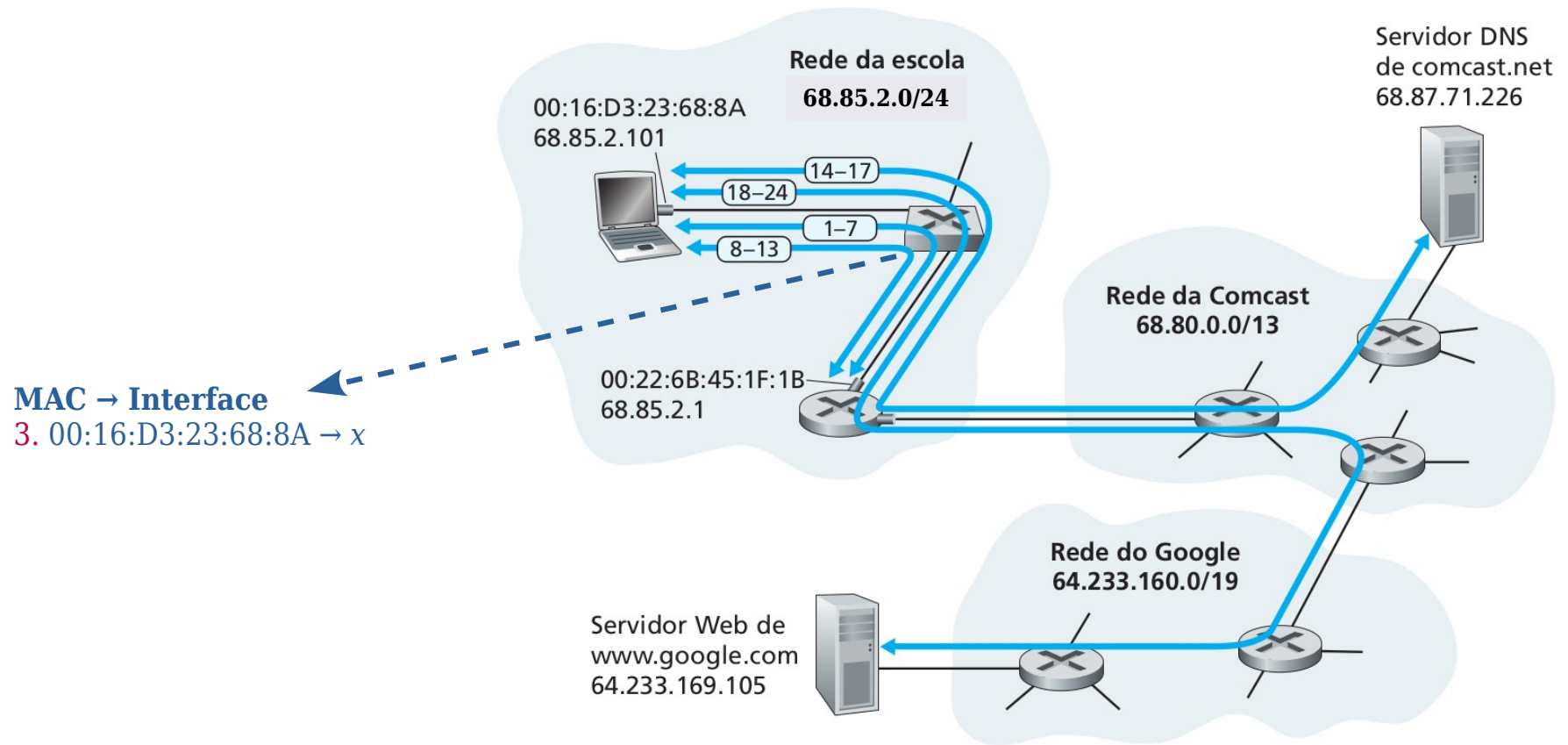
# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



1. O cliente cria uma mensagem de solicitação DHCP. A mensagem é colocada em um segmento UDP (porta de origem 68, porta de destino 67). O segmento UDP é colocado em um datagrama IP (IP de origem 0.0.0.0, IP de destino 255.255.255.255).
2. O datagrama IP é colocado em um quadro Ethernet (MAC de origem 00:16:D3:23:68:8A, MAC de destino FF:FF:FF:FF:FF:FF).
3. O quadro Ethernet é enviado ao switch. O switch aprende o endereço MAC associado a interface por onde a mensagem chegou (MAC 00:16:D3:23:68:8A → Interface x).



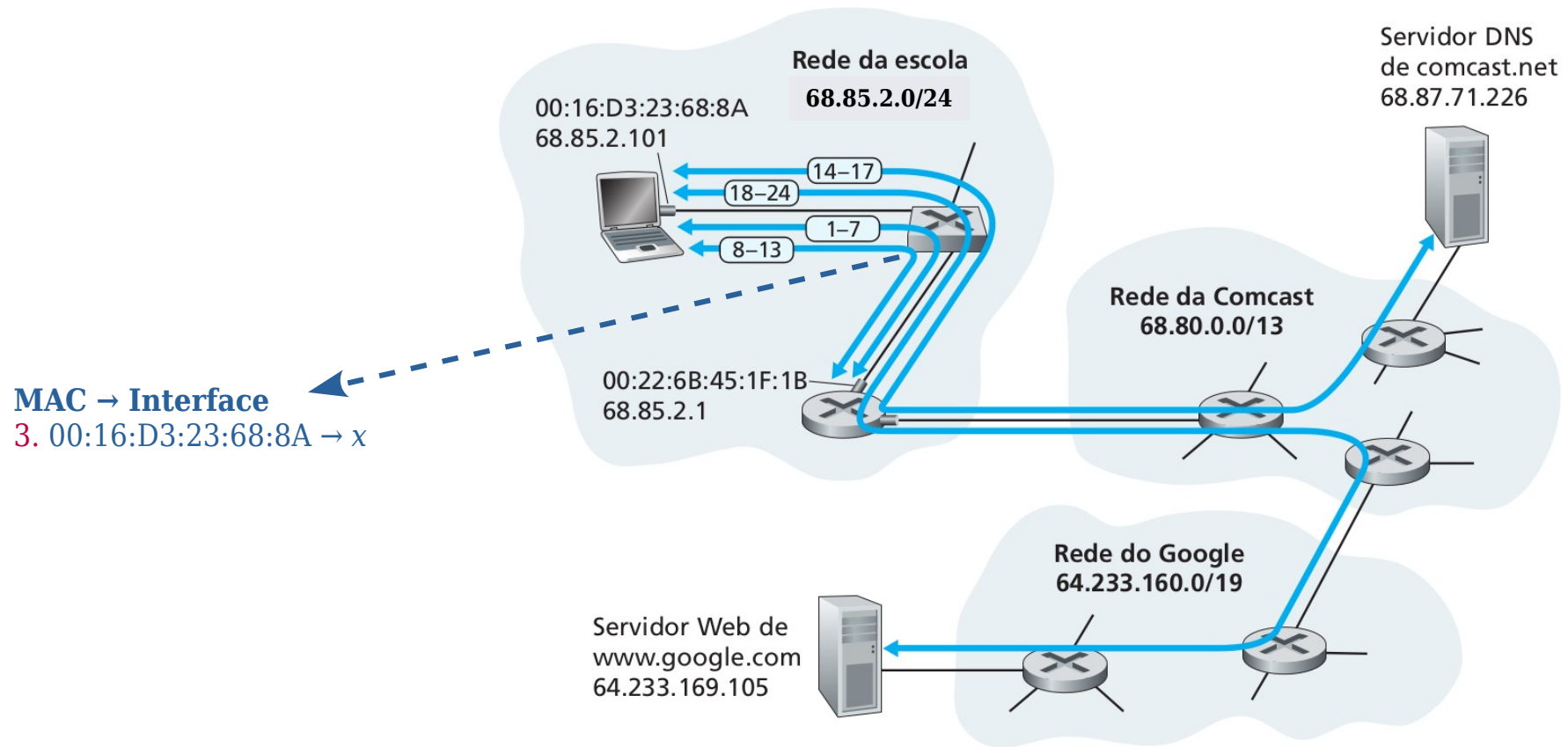
# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



4. O roteador recebe o quadro Ethernet e extrai o datagrama IP. O sub-sistema de rede extrai o segmento UDP do datagrama IP e confirma que há um processo servidor que pode atender a solicitação (porta 67, UDP). A mensagem DHCP é extraída do segmento UDP e entregue ao servidor DHCP.



# Um dia na vida de uma solicitação de página Web

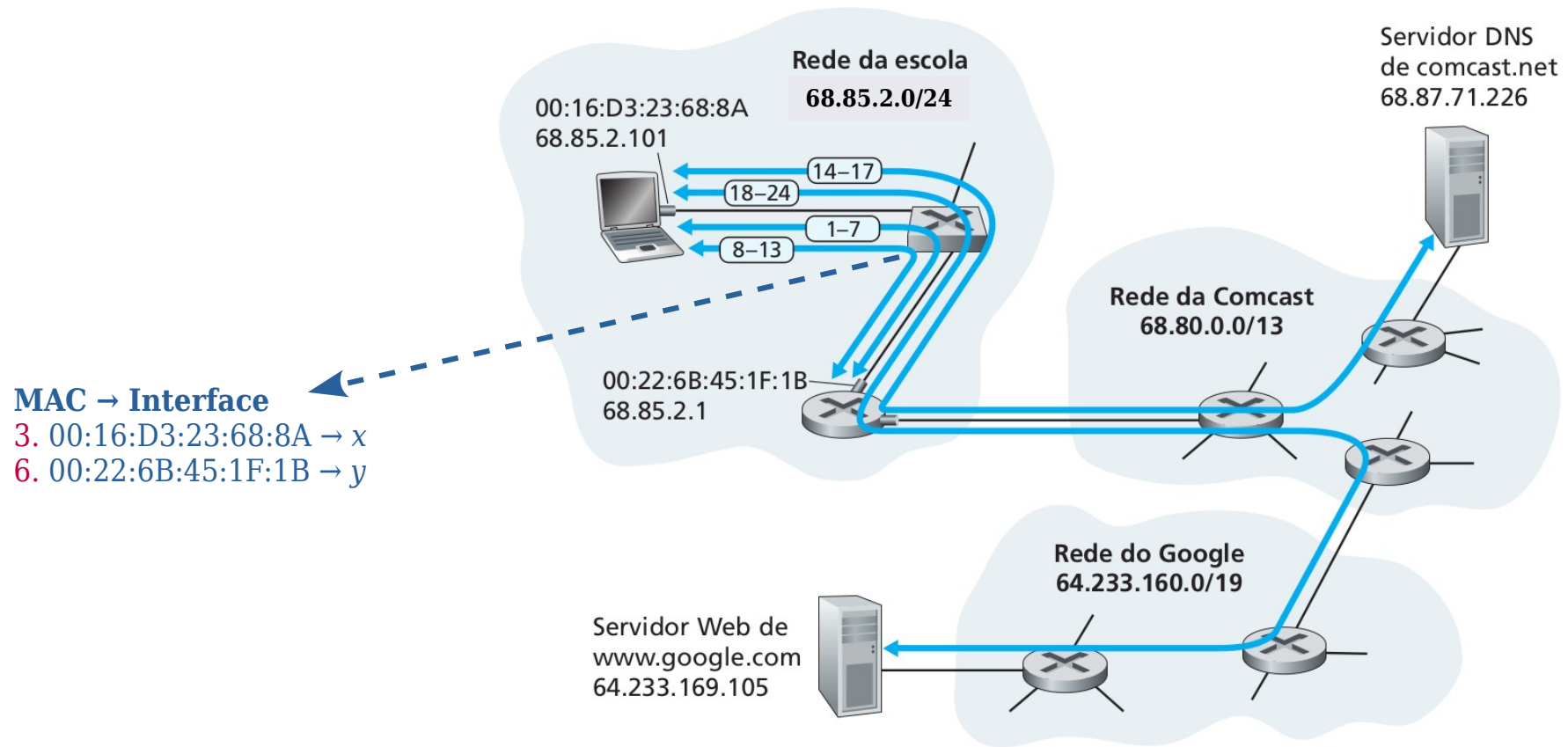


5. O servidor DHCP atribui um endereço IP ao cliente e cria uma mensagem DHCP (ACK) contendo:

- IP do cliente = 68.85.2.101
- IP do servidor DNS = 68.87.71.226
- IP do gateway da rede = 68.85.2.1
- Endereço da rede = 68.85.2.0/24

A mensagem DHCP é colocada em um segmento UDP (porta de origem 67, porta de destino 68), o qual é colocado em um datagrama IP (IP de origem 68.85.2.1, IP de destino 255.255.255.255), o qual é colocado em um quadro Ethernet (MAC de origem 00:22:6B:45:1F:1B, MAC de destino 00:16:D3:23:68:8A).

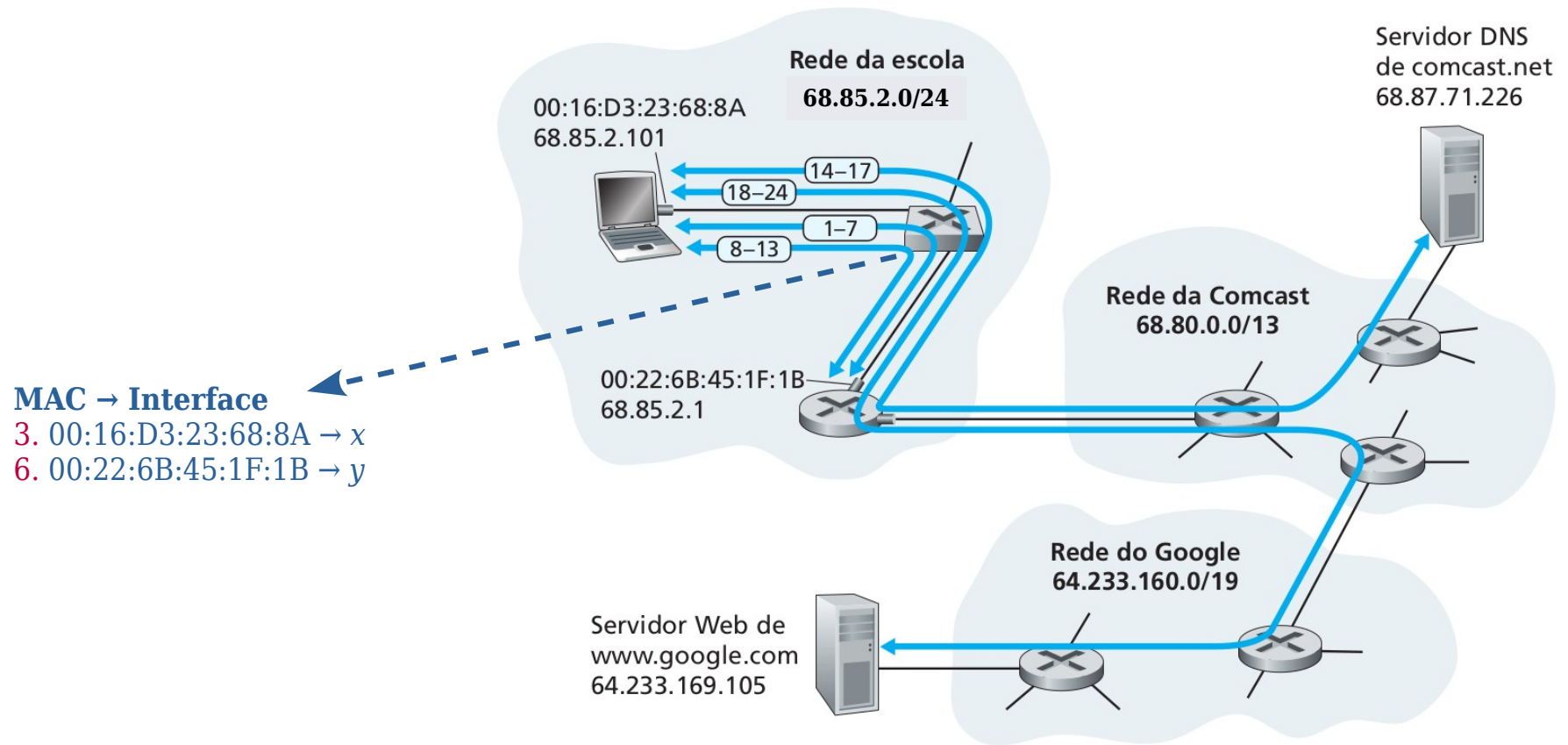
# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



6. O quadro Ethernet é enviado ao switch. O switch aprende o endereço MAC associado a interface por onde a mensagem chegou (MAC 00:22:6B:45:1F:1B → Interface y). A essa altura o switch já conhece os endereços MAC do cliente e do roteador e, portanto, encaminha a mensagem por unicast.

7. O cliente recebe o quadro Ethernet, extrai o datagrama IP, extrai o segmento UDP, extrai a mensagem DHCP e, finalmente, configura sua interface de rede.

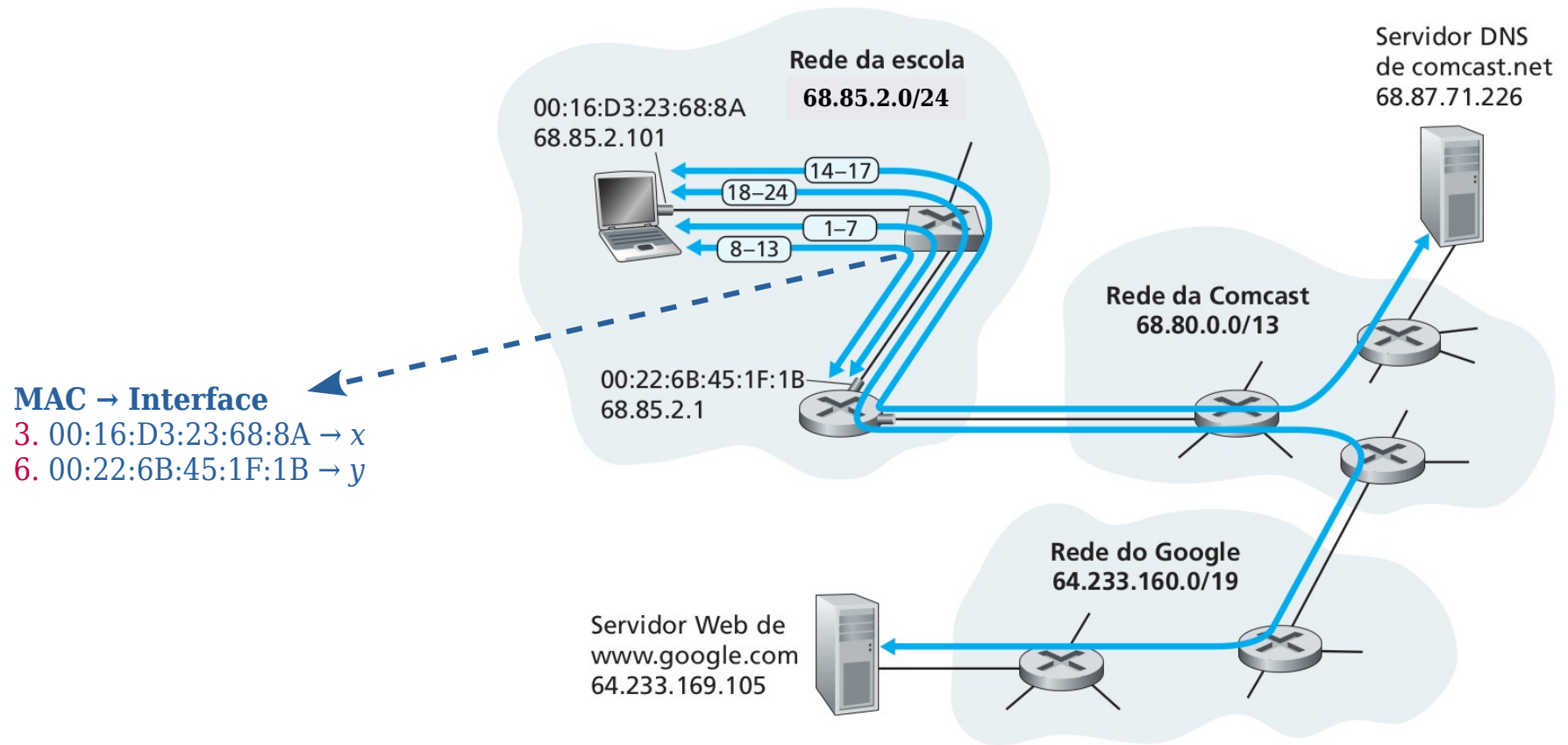
# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



8. [www.google.com](http://www.google.com) - Uma mensagem de consulta DNS é criada para a cadeia de caracteres "www.google.com", a qual é colocada em um segmento UDP (porta de destino 53). O segmento UDP é então colocado em um datagrama IP (IP de origem 68.85.2.101, IP de destino 68.87.71.226).

9. O datagrama IP é colocado em um quadro Ethernet, que precisa ter o MAC de destino do gateway da rede (00:22:6B:45:1F:1B). No entanto, o cliente ainda não conhece o endereço MAC do roteador.

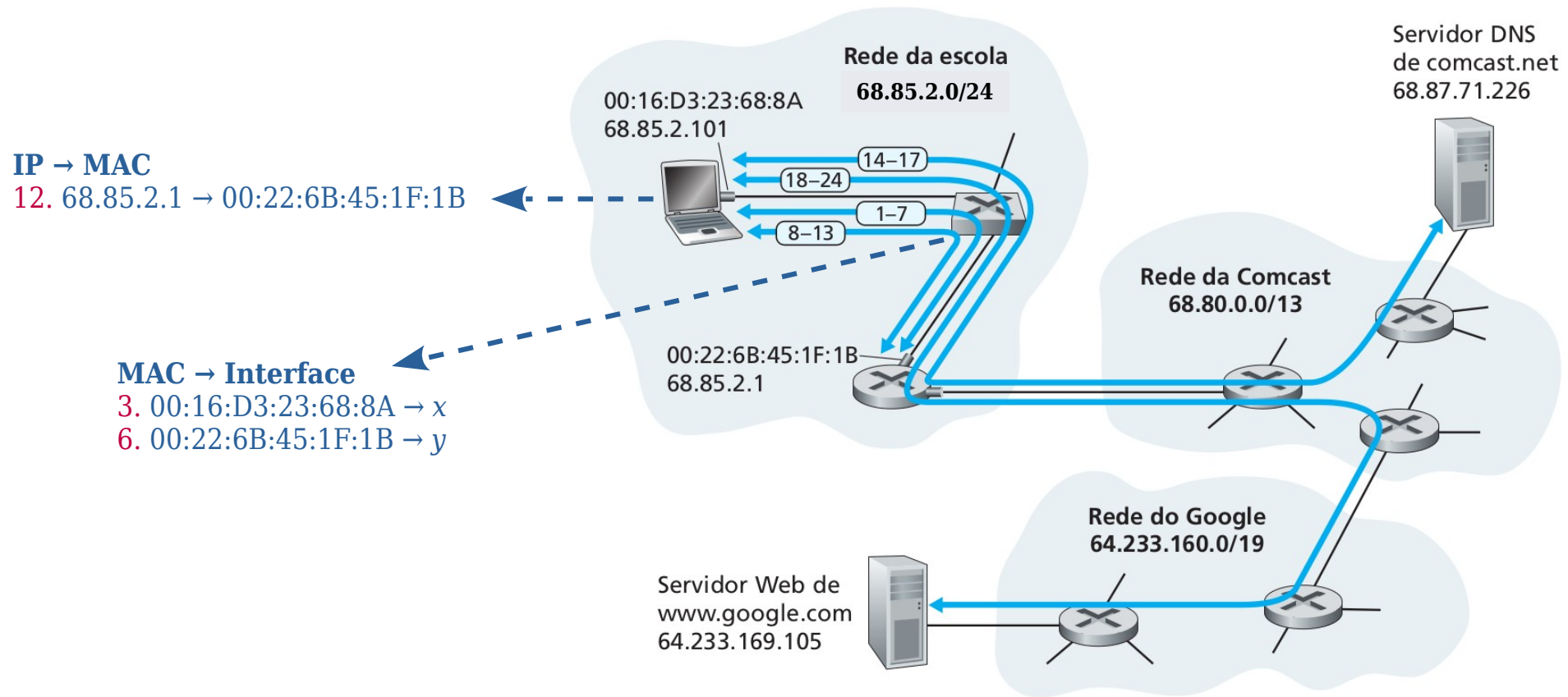
# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



10. O cliente cria, então, um pacote ARP direcionado ao IP 68.85.2.1 (porta padrão), coloca o pacote em um quadro Ethernet (MAC de destino FF:FF:FF:FF:FF:FF) e envia ao switch.

11. O gateway recebe um quadro contendo o pacote ARP e descobre que o endereço IP de destino 68.85.2.1 no pacote corresponde ao seu endereço IP. Uma resposta ARP é então criada informando o seu endereço MAC (00:22:6B:45:1F:1B). A resposta ARP é colocada em um quadro Ethernet (MAC de destino 00:16:D3:23:68:8A) e enviada ao switch.

# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



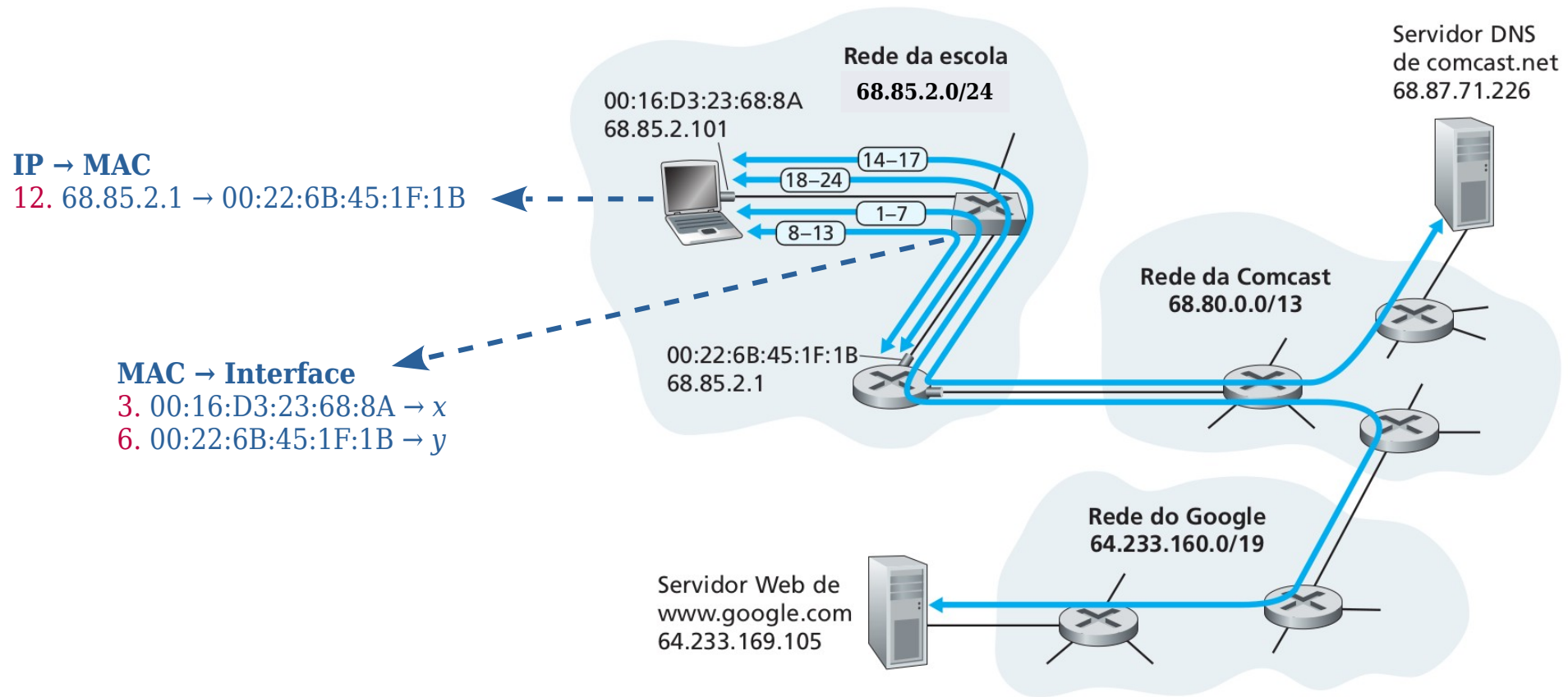
12. O cliente recebe o quadro Ethernet contendo a mensagem de resposta ARP e extrai o endereço MAC do gateway. Neste caso o cliente adiciona em sua tabela ARP o mapeamento:

IP 68.85.2.1 → MAC 00:22:6B:45:1F:1B

13. Finalmente o cliente pode completar o quadro Ethernet com a mensagem de consulta DNS de modo a conter o endereço MAC do gateway. O quadro é então enviado ao switch.

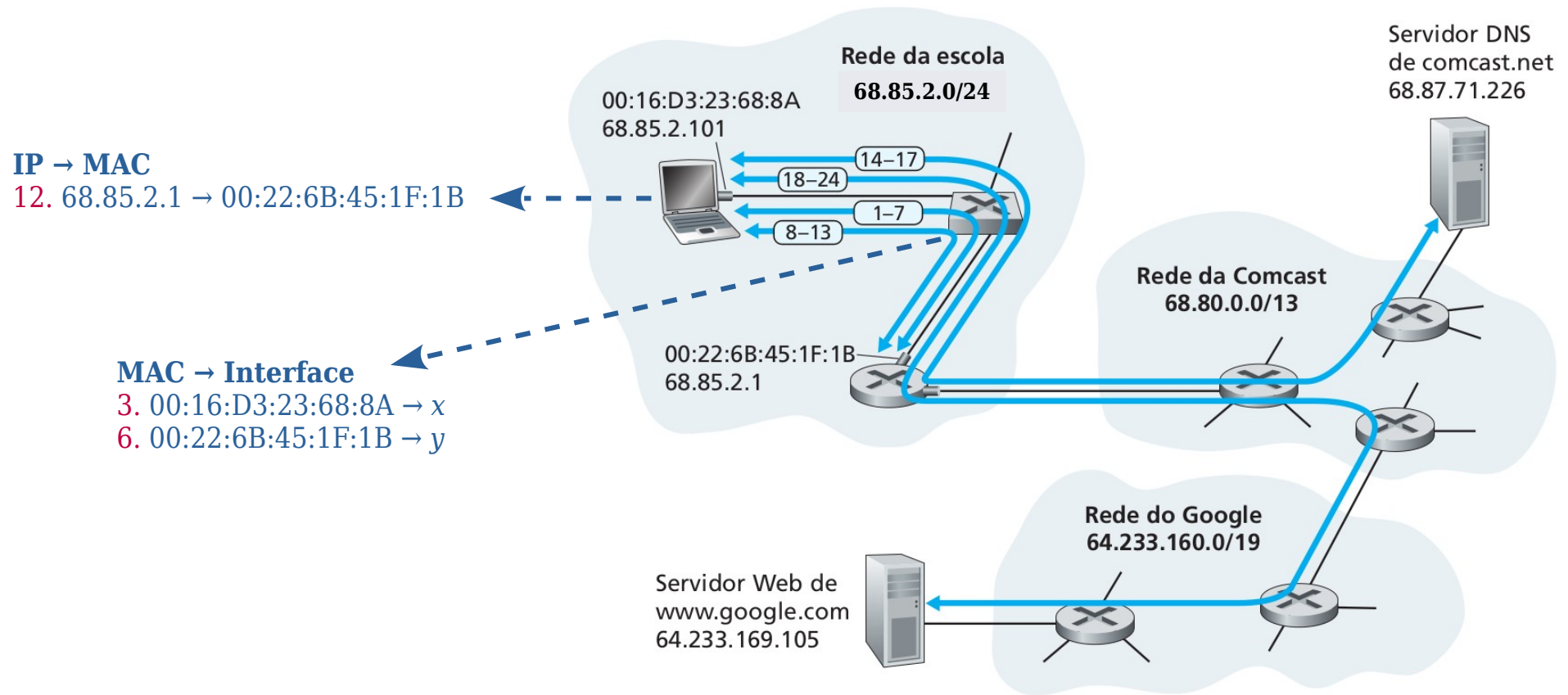


# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



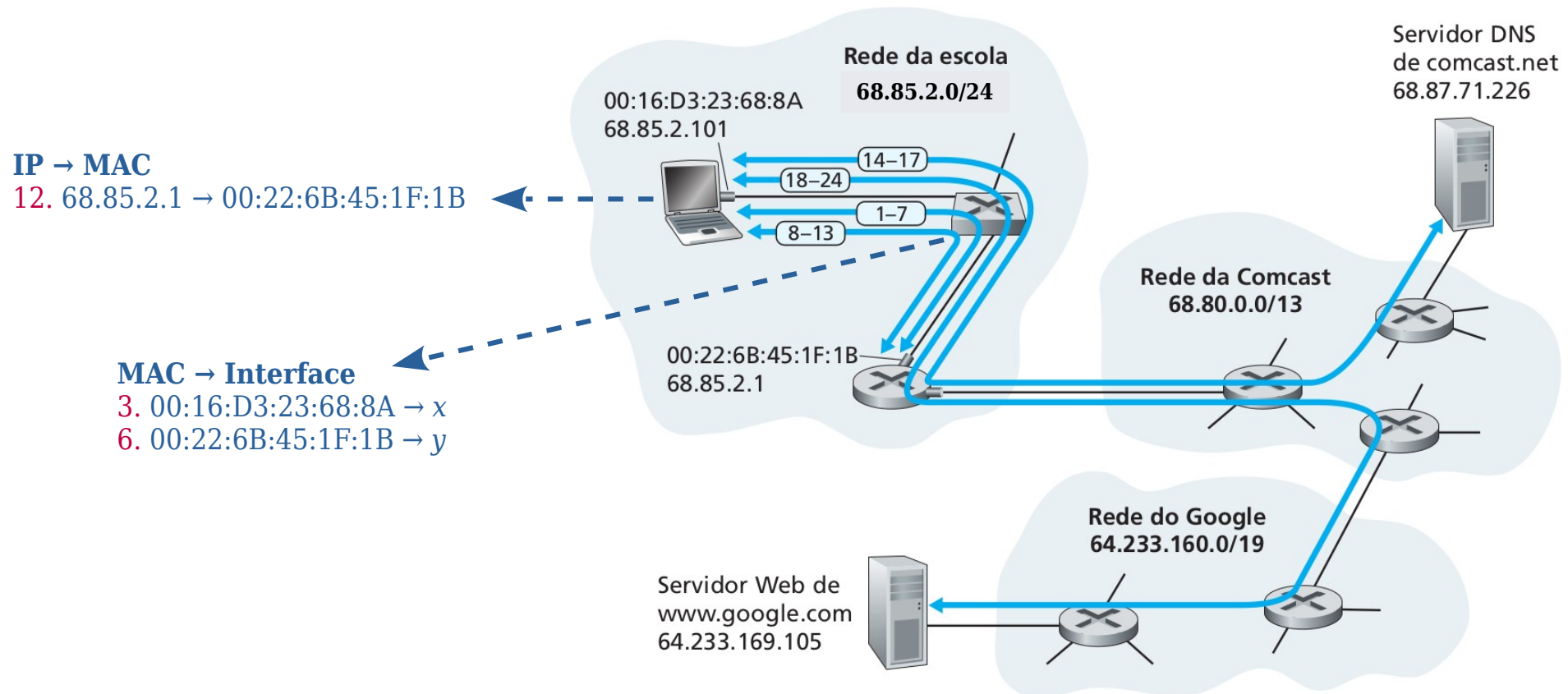
14. O gateway recebe o quadro e extrai o datagrama IP que contém a consulta DNS. O roteador procura o endereço de destino desse datagrama (IP 68.87.71.226) e determina a partir de sua tabela de repasse para qual roteador da rede Comcast ele deve ser encaminhado. O datagrama IP é colocado em um quadro apropriado ao tipo de enlace que interconecta o roteador da escola ao roteador da Comcast e logo em seguida é enviado.

# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



15. Ao receber o quadro, o roteador da Comcast extrai o datagrama IP, examina o endereço de destino do datagrama (IP 68.87.71.226) e determina, a partir de sua tabela de repasse, a interface de saída pela qual enviará o datagrama. Mais uma vez, o datagrama IP é colocado em um quadro apropriado ao tipo de enlace que interconecta os roteadores emissor e receptor.

# Um dia na vida de uma solicitação de página Web

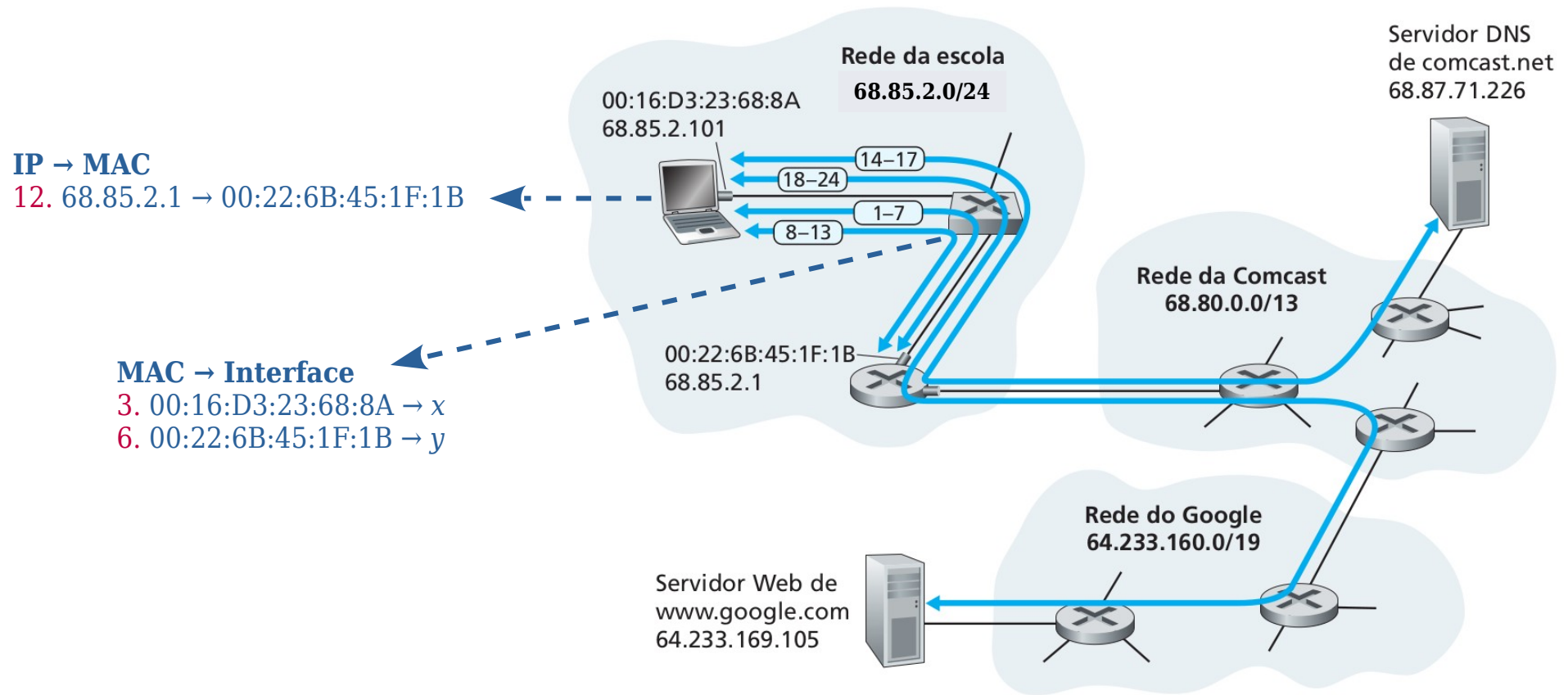


16. Por fim, o datagrama IP contendo a consulta DNS chega ao servidor DNS. Este extrai a mensagem de consulta DNS e procura o nome "www.google.com" em sua base de dados DNS. Ao obter o registro de recurso DNS que contém o endereço IP 64.233.169.105, o servidor DNS cria uma mensagem DNS de resposta, coloca a mensagem em um segmento UDP, coloca o segmento dentro de um datagrama IP endereçado ao cliente (IP 68.85.2.101) e envia os dados dentro de um quadro apropriado a camada de enlace a qual o servidor está conectado.

17. Ao receber a resposta DNS, o cliente reconhece o endereço IP de "www.google.com". Enfim, depois de muito trabalho, o cliente está pronto para, de fato, contatar o servidor "www.google.com".



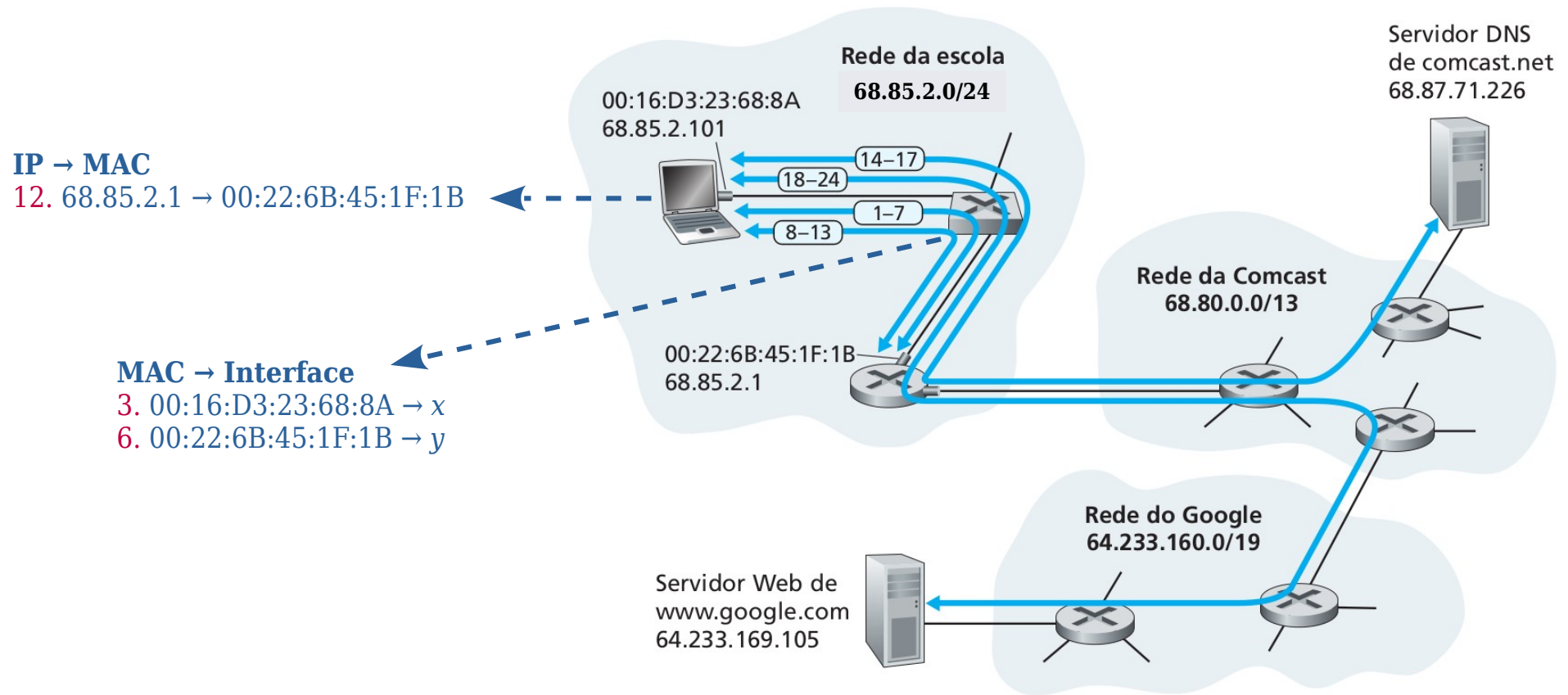
# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



18. O cliente cria um socket TCP com o servidor "www.google.com". Inicialmente um segmento TCP SYN (porta de origem arbitrária, porta de destino 80) é criado. O segmento é colocado em um datagrama IP (IP de origem 68.85.2.1, IP de destino 64.233.169.105). O datagrama é colocado em um quadro Ethernet (MAC de origem 00:16:D3:23:68:8A, MAC de destino do gateway 00:22:6B:45:1F:1B). O quadro é enviado ao switch.

19. O datagrama é encaminhado pelos roteadores até chegar ao seu destino.

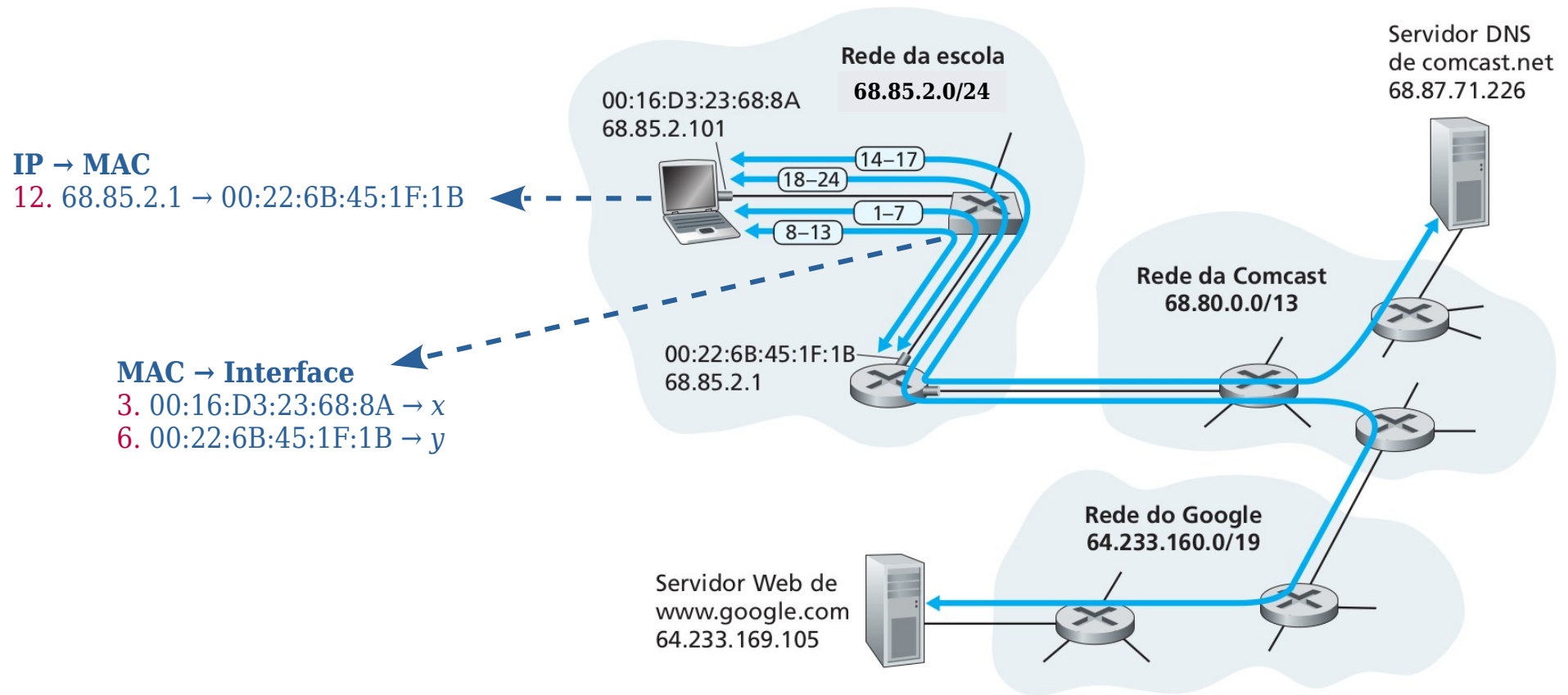
# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



20. Por fim, o datagrama contendo o TCP SYN chega ao servidor "www.google.com". O segmento TCP SYN é extraído do datagrama e entregue ao socket associado à porta 80. Um socket de conexão é criado para a conexão TCP entre o servidor HTTP do Google e o cliente. Um segmento TCP SYN/ACK é criado, colocado em um datagrama endereçado ao cliente, e enfim colocado em um quadro apropriado ao enlace conectando "www.google.com" ao roteador de primeiro salto.

21. O datagrama contendo o segmento TCP SYN/ACK é encaminhado pelos roteadores até chegar ao cliente, onde é entregue ao socket TCP criado pelo cliente, que entra em estado de conexão.

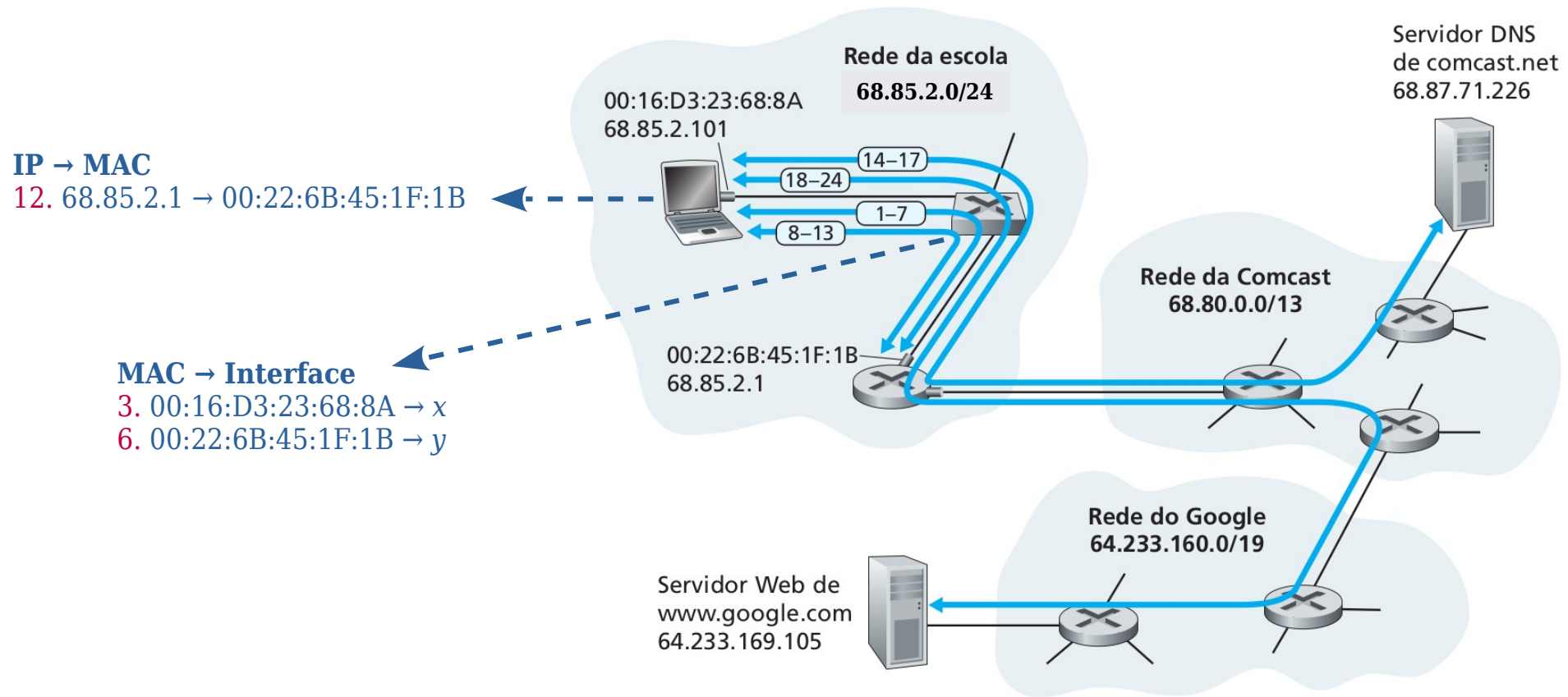
# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



22. Agora, com a conexão estabelecida, o navegador cliente cria uma mensagem HTTP GET contendo a URL a ser acessada. A mensagem HTTP GET é enviada ao socket, com a mensagem GET se tornando a carga útil do segmento TCP. O segmento TCP é colocado em um datagrama e enviado e entregue em "www.google.com".

23. O servidor HTTP "www.google.com" lê a mensagem HTTP GET do socket TCP, cria uma mensagem de resposta HTTP, coloca o conteúdo da página Web requisitada no corpo da mensagem de resposta HTTP e envia a mensagem pelo socket TCP.

# Um dia na vida de uma solicitação de página Web



24. O datagrama contendo a mensagem de resposta HTTP é encaminhado pelos roteadores até chegar ao seu destino. O navegador cliente lê a resposta HTTP do socket, extrai o conteúdo HTML do corpo da mensagem HTTP, e enfim renderiza a página Web.

# Questões de revisão

1. Que tamanho tem o espaço de endereços MAC? E o espaço de endereços IPv4? E o espaço de endereços IPv6?
2. Suponha que cada um dos nós A, B e C esteja ligado à mesma LAN de difusão (por meio de seus adaptadores). Se A enviar milhares de datagramas IP a B com quadro de encapsulamento endereçado ao endereço MAC de B, o adaptador de C processará esses quadros? Se processar, ele passará os datagramas IP desses quadros para C? O que mudaria em suas respostas se A enviasse quadros com o endereço MAC de difusão?
3. Por que uma pesquisa ARP é enviada dentro de um quadro de difusão? Por que uma resposta ARP é enviada em um quadro com um endereço MAC de destino específico?
4. Compare as estruturas de quadro das redes 10BASE-T, 100BASE-T e Gigabit Ethernet. Quais as diferenças entre elas?

