

Redes de Computadores

Camada de Enlace

Professor: Fábio Renato de Almeida

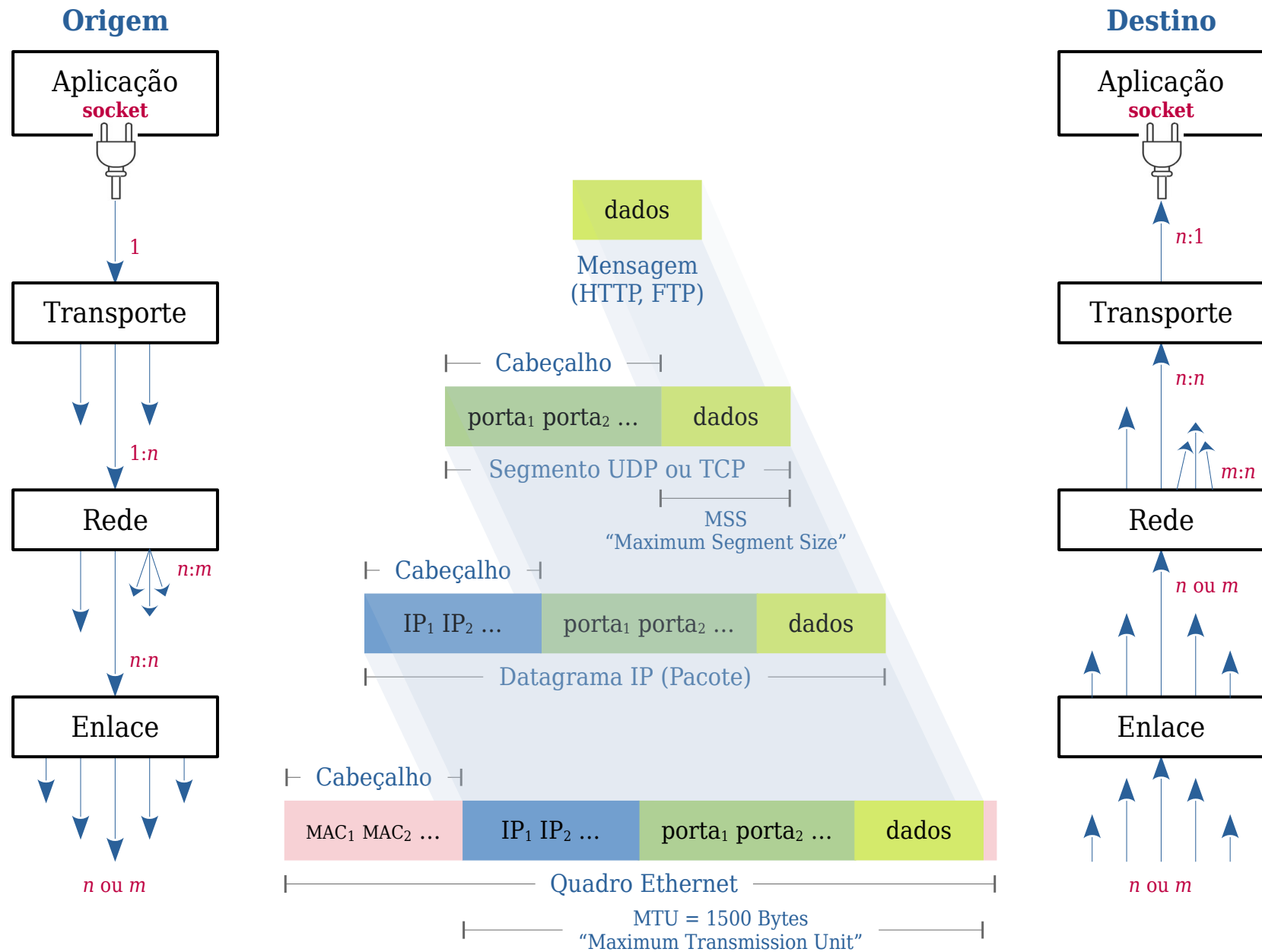
<https://github.com/fabiorenatodealmeida>

e-mail: fabiorenatodealmeida@hotmail.com

Bibliografia



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.

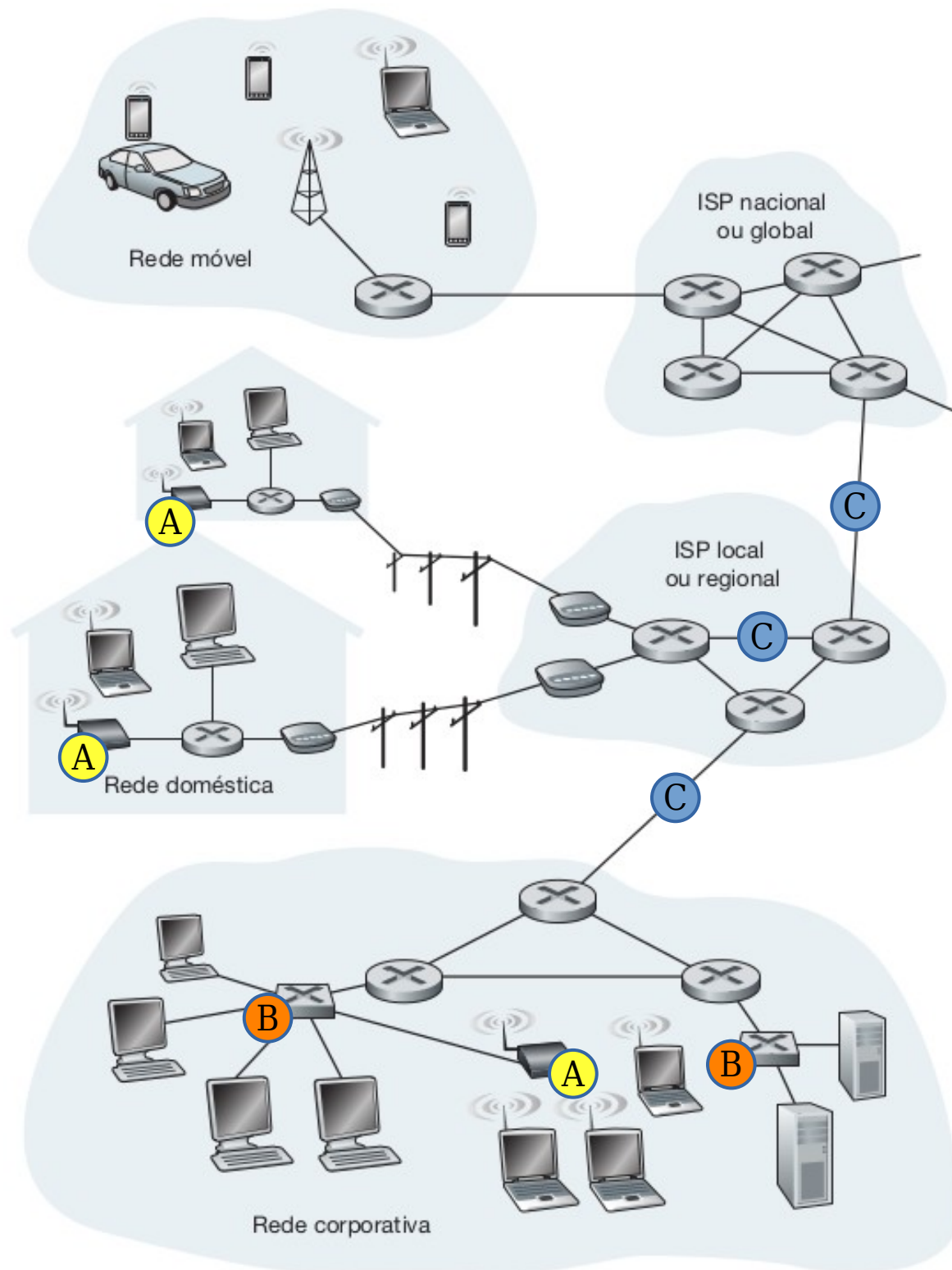
A Protocolo Wi-Fi

Meio dedicado

Enlace de comunicação ponto a ponto.

B Protocolo Ethernet

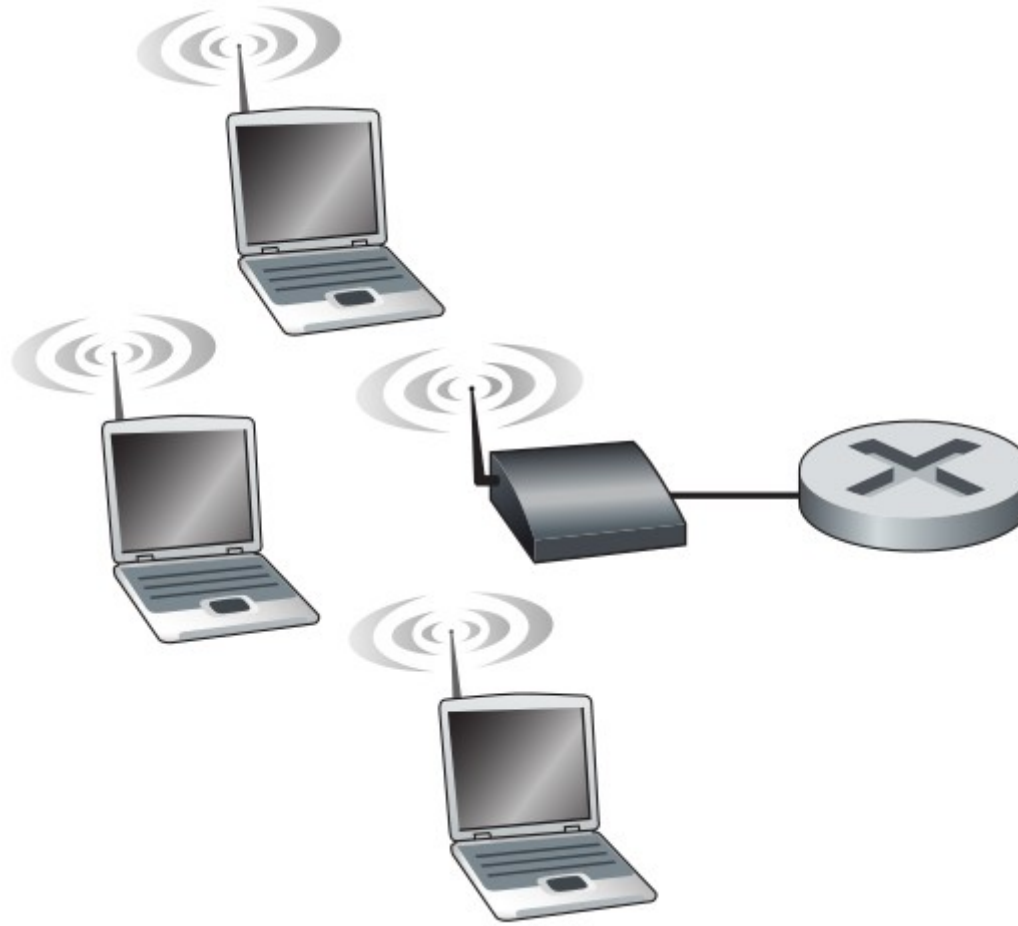
C Point-to-Point Protocol (PPP)



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?”

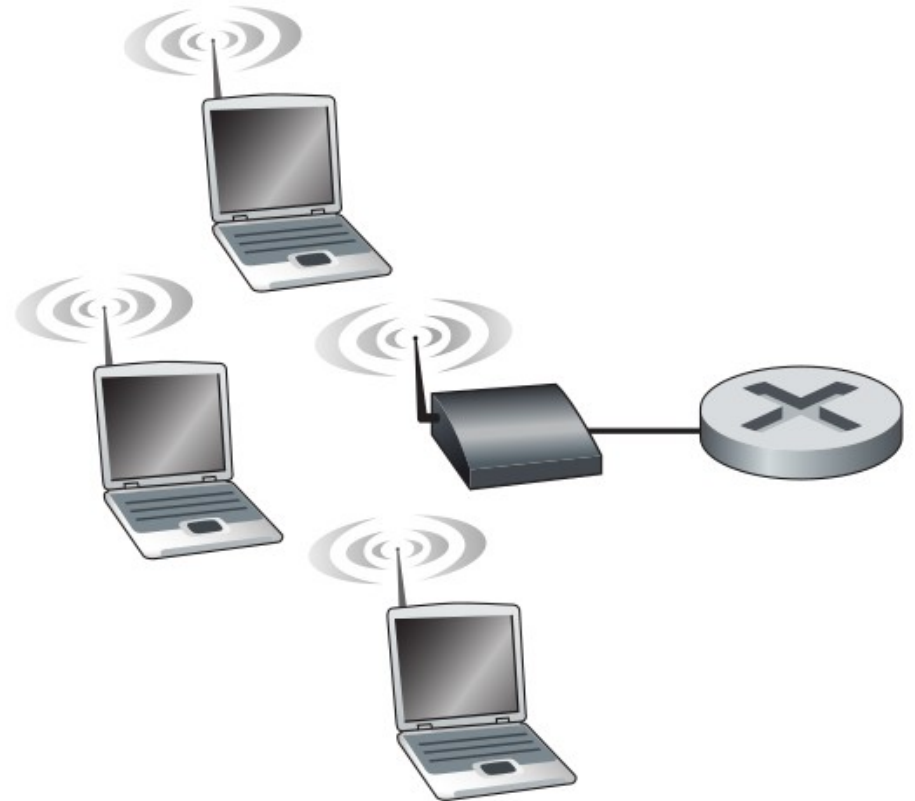
COLISÃO → Largura de banda desperdiçada

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.

Protocolos de controle de acesso ao meio

3. Protocolos de revezamento

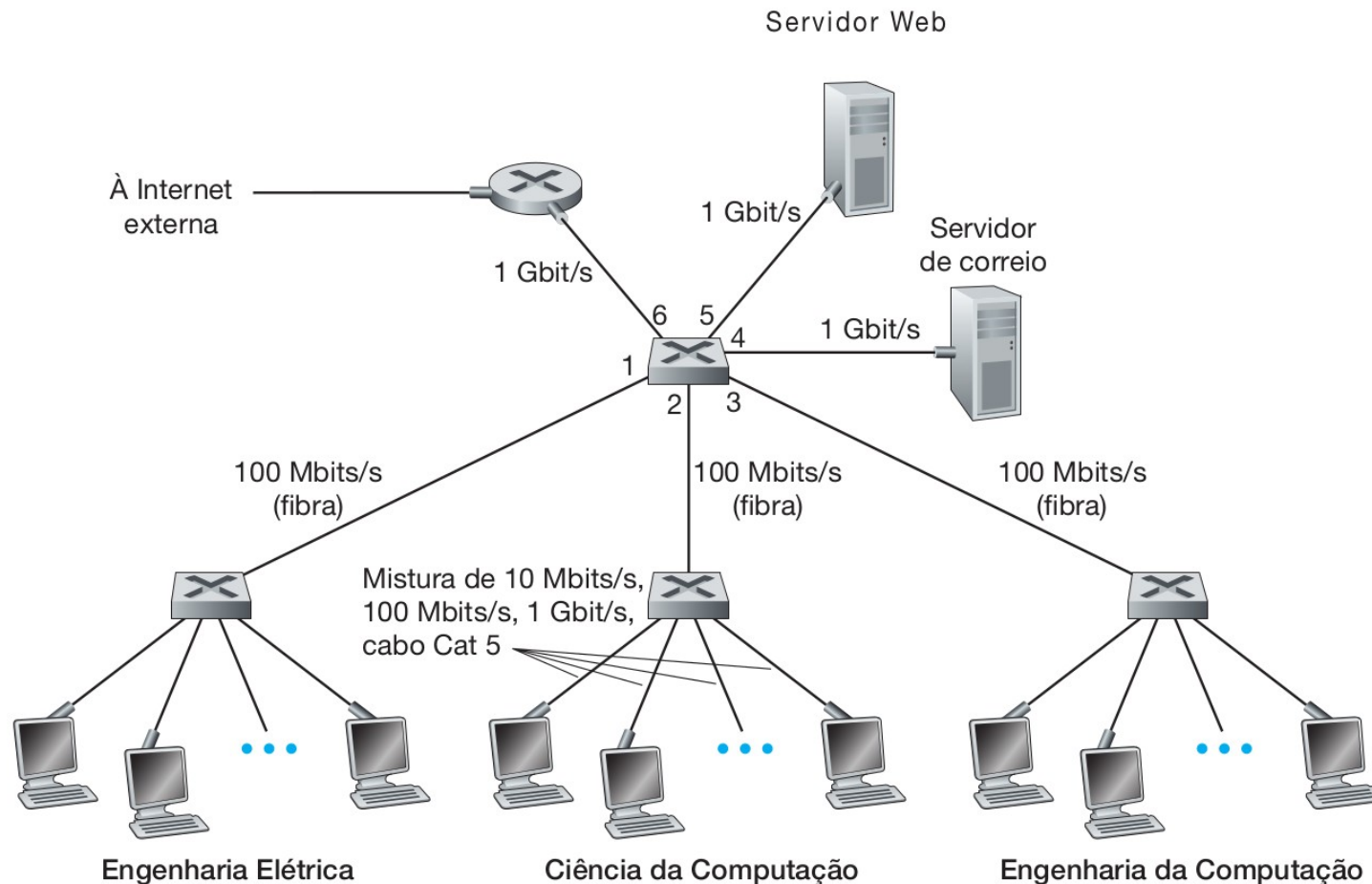
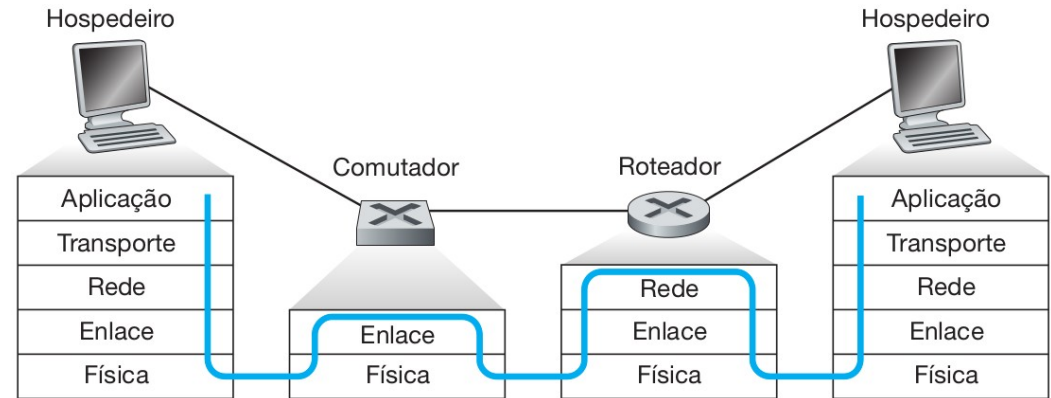
Polling (Seleção): Requer que um dos hospedeiros seja designado como nó mestre. O nó mestre seleciona cada um dos nós por alternância circular e envia permissão para transmitir até um certo número máximo de quadros. Elimina colisões mas introduz um atraso de seleção durante a alternância circular.

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...

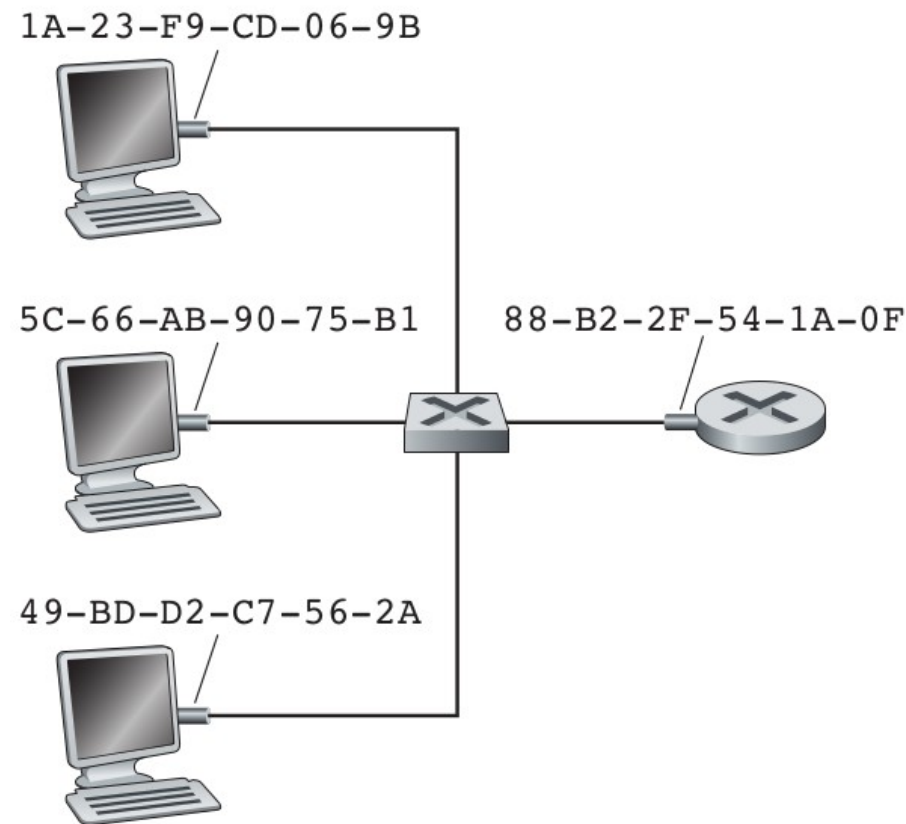
- Operam na camada de enlace
- Comutam quadros (não datagramas)
- Não reconhecem endereços IP
- Usam endereços MAC



Endereço MAC - Media Access Control

Endereço físico da placa de rede: 48 bits

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



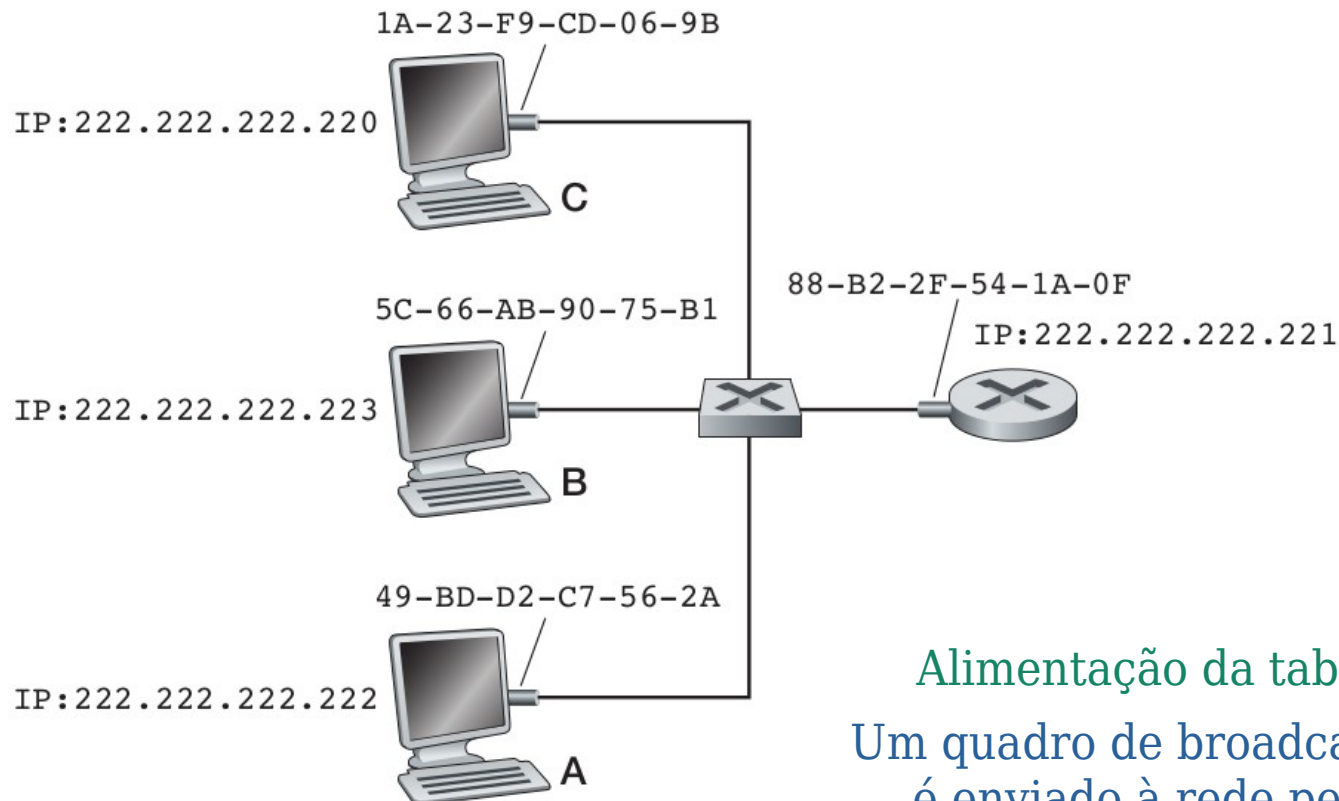
Endereço MAC de broadcast: FF-FF-FF-FF-FF-FF

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

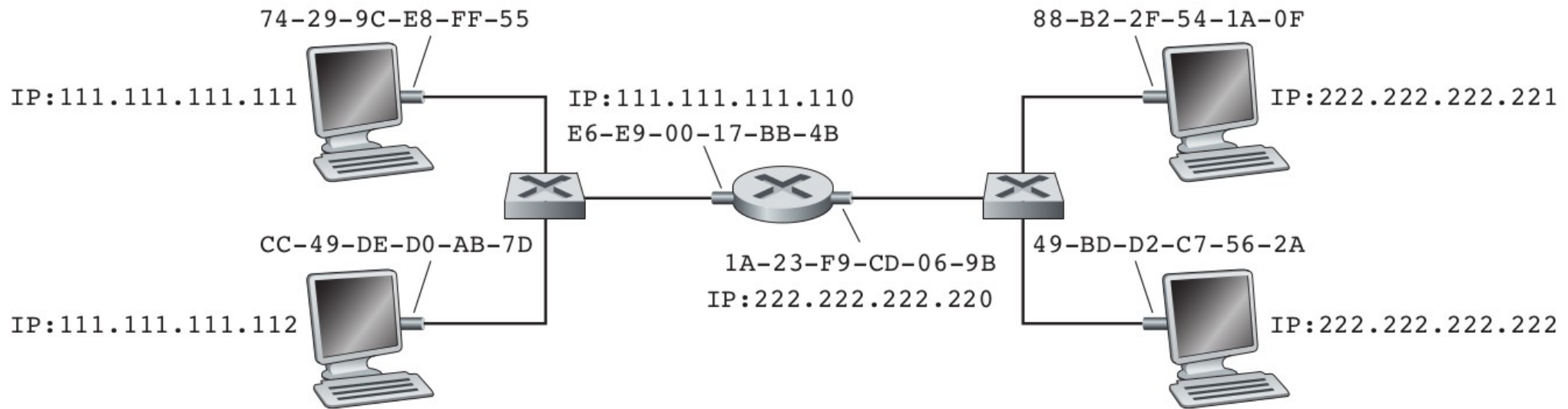
Tipicamente 20
minutos



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:



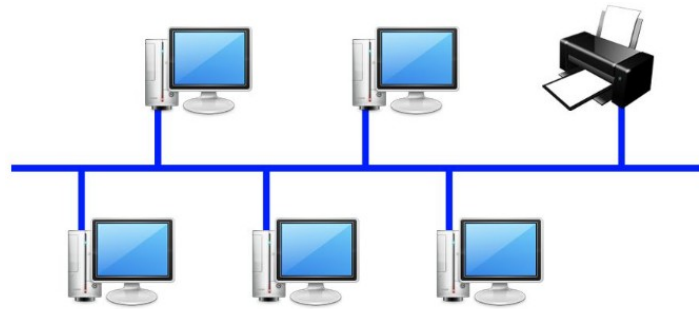
Como um datagrama é enviado da máquina com IP 111.111.111.111 até a máquina com IP 222.222.222.222

?

LANs Ethernet

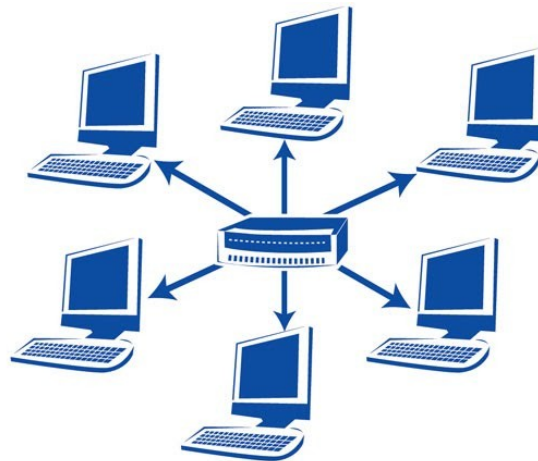
Topologia de barramento

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 sincronização emissor/receptor.

Bytes de 1 a 7 = 10101010

Byte 8 = 10101011

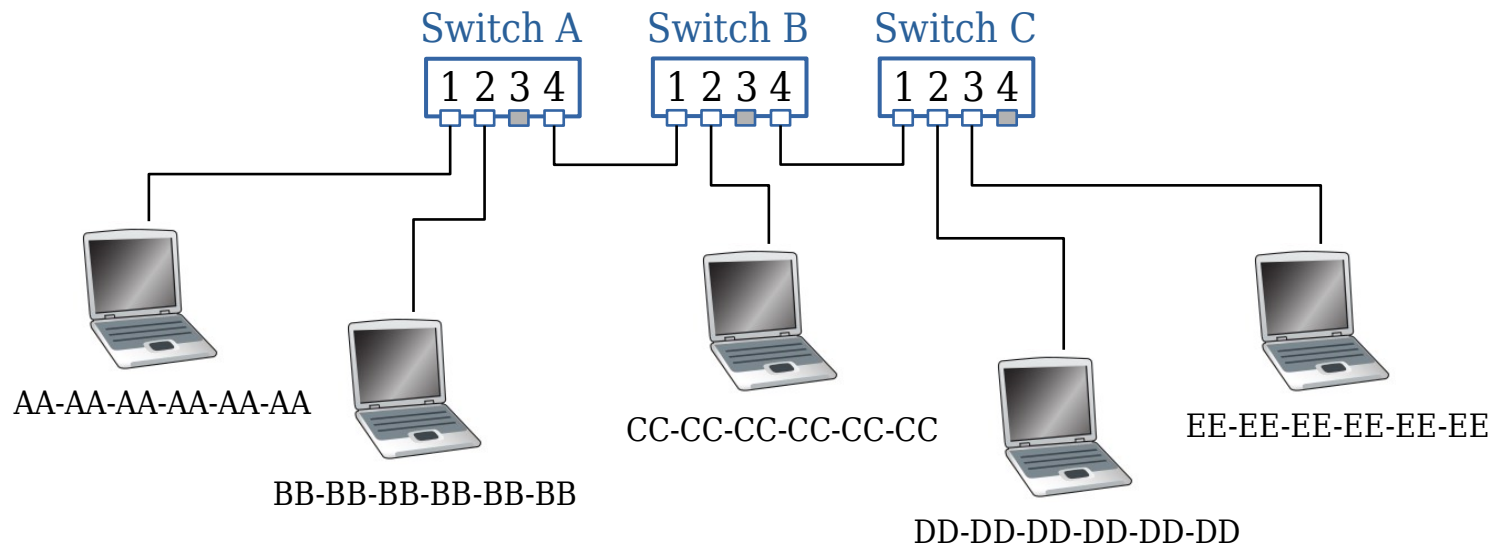
Endereços de destino e origem (6 bytes cada): Endereços MAC.

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.

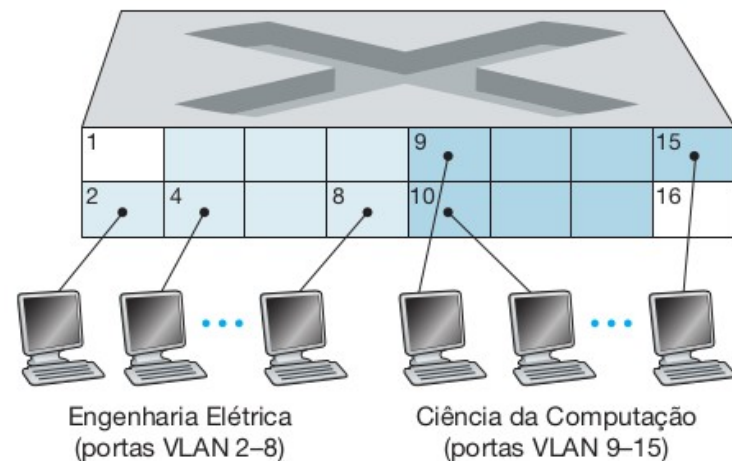
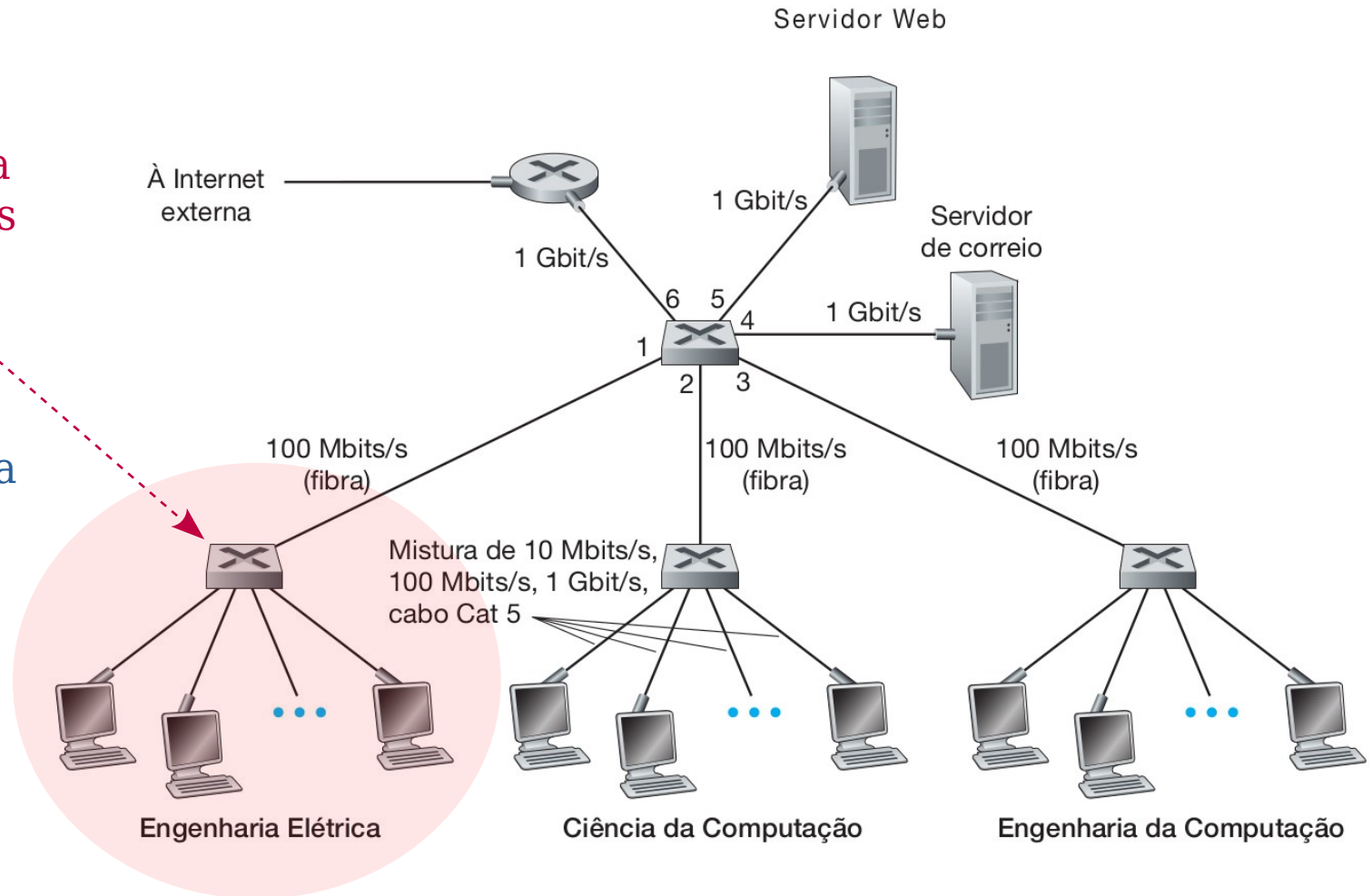
Se não houver uma entrada na tabela para um endereço de destino, o comutador transmite o quadro por difusão.

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.

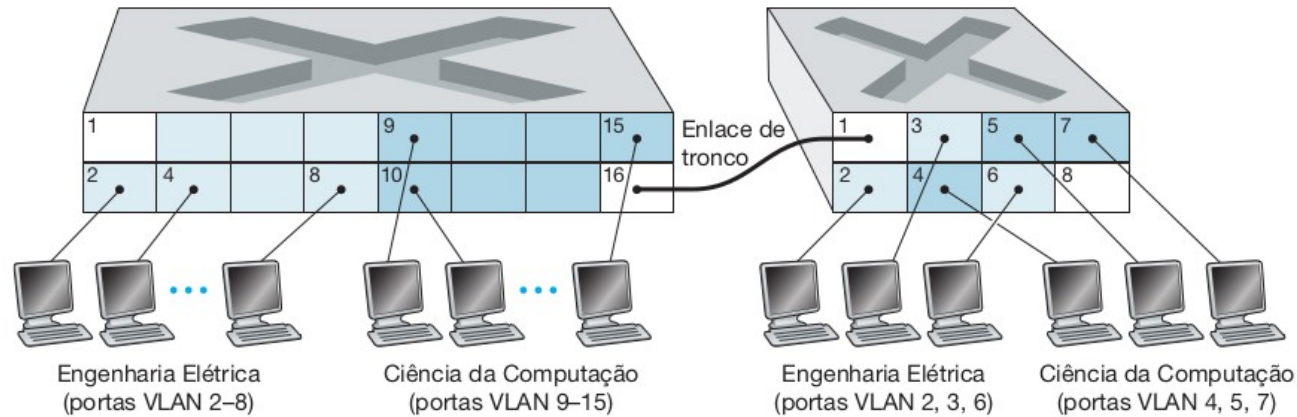
VLANs atuam na camada 2.



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.

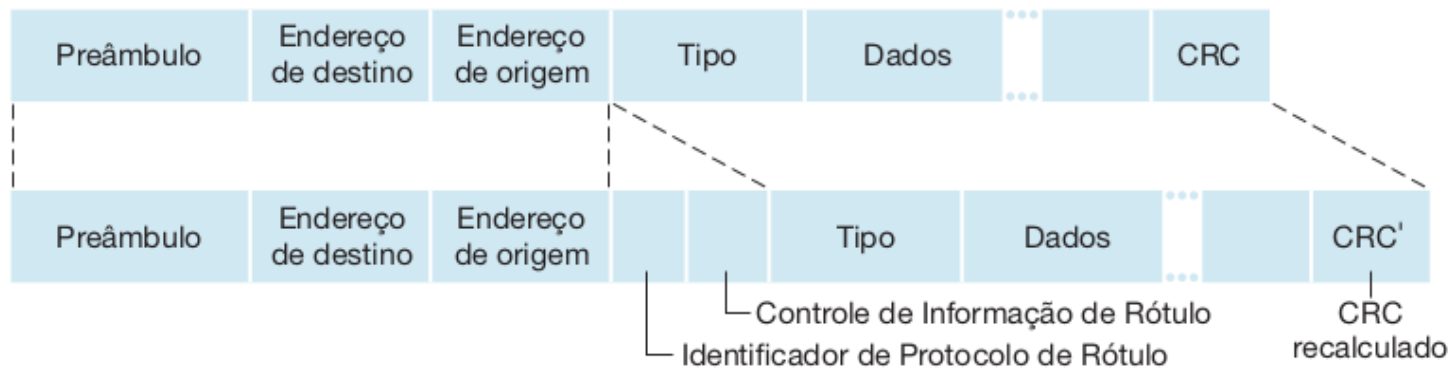
Entroncamento de VLANs



A porta de tronco pertence a todas as VLANs.

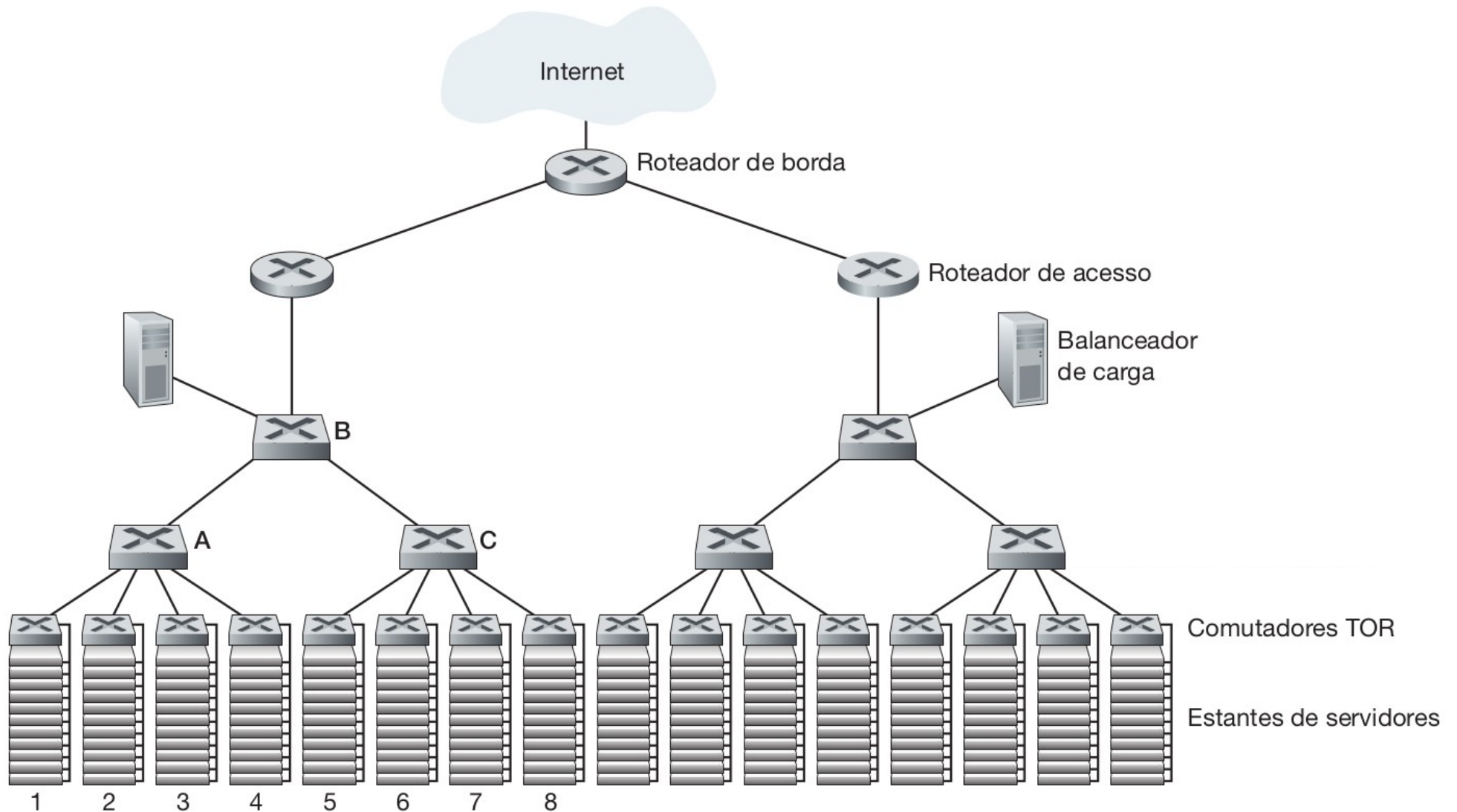
Quadros enviados a qualquer VLAN são encaminhados pelo enlace de tronco ao outro comutador.

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



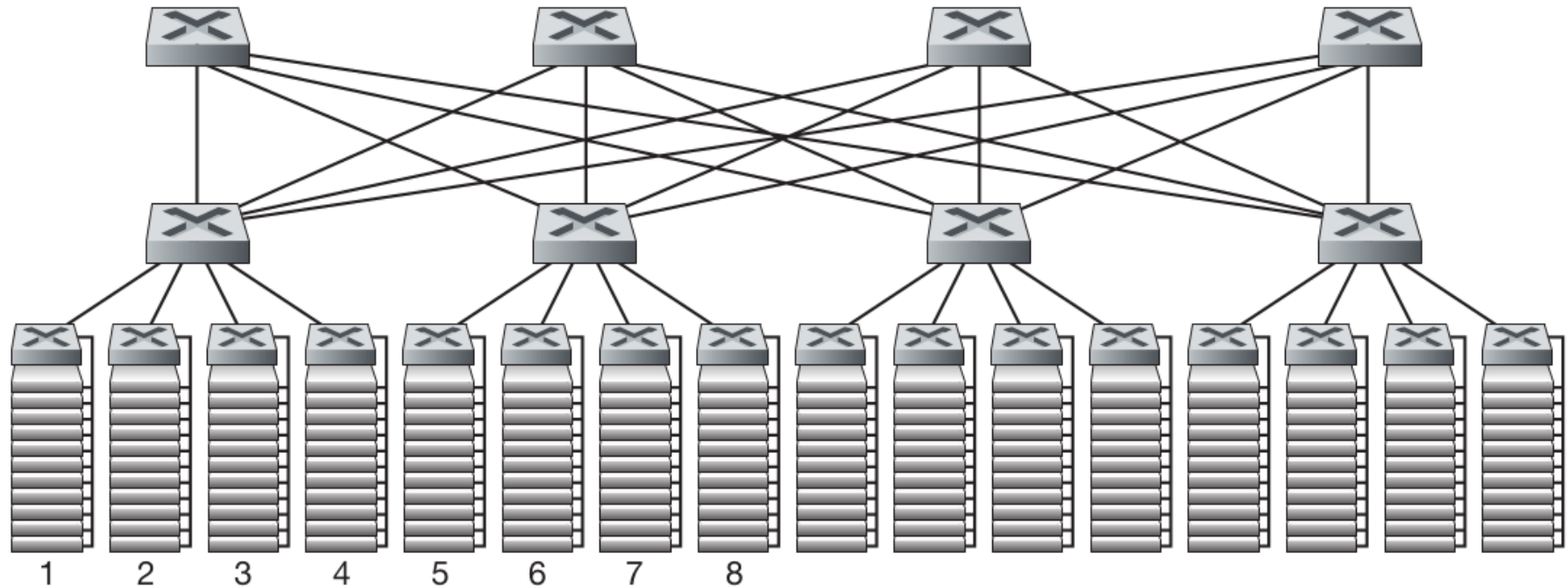
O rótulo (**tag**) da VLAN é adicionado ao quadro pelo comutador no lado de envio e removido pelo comutador no lado de recebimento.

Datacenter com topologia de rede hierárquica



TOR: Top of Rack

Datacenter com topologia de rede totalmente conectada

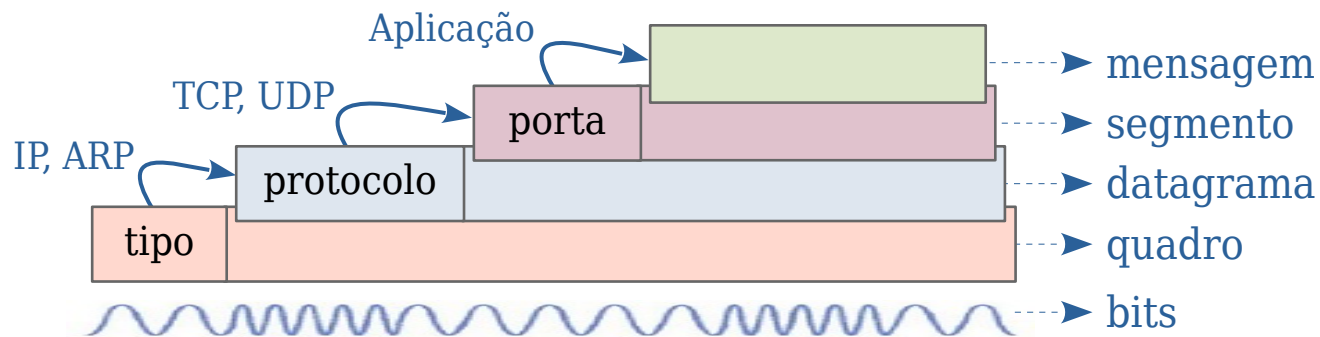


Algoritmos de roteamento entre comutadores...

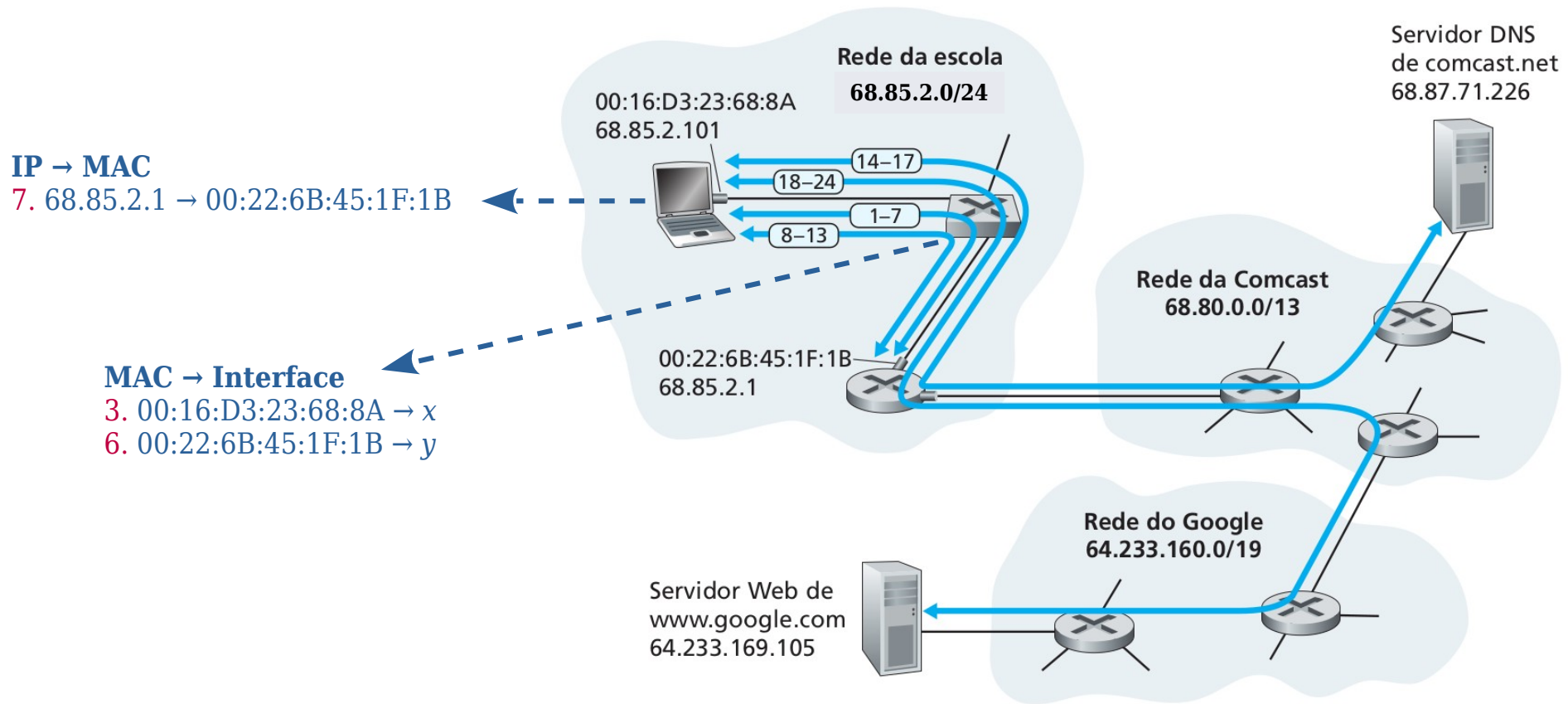
Roteamento aleatório, ou utilizar duas ou mais placas de rede nos hospedeiros e conectá-las a comutadores diferentes e permitir que os próprios hospedeiros direcionem o tráfego de modo inteligente entre os comutadores.

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

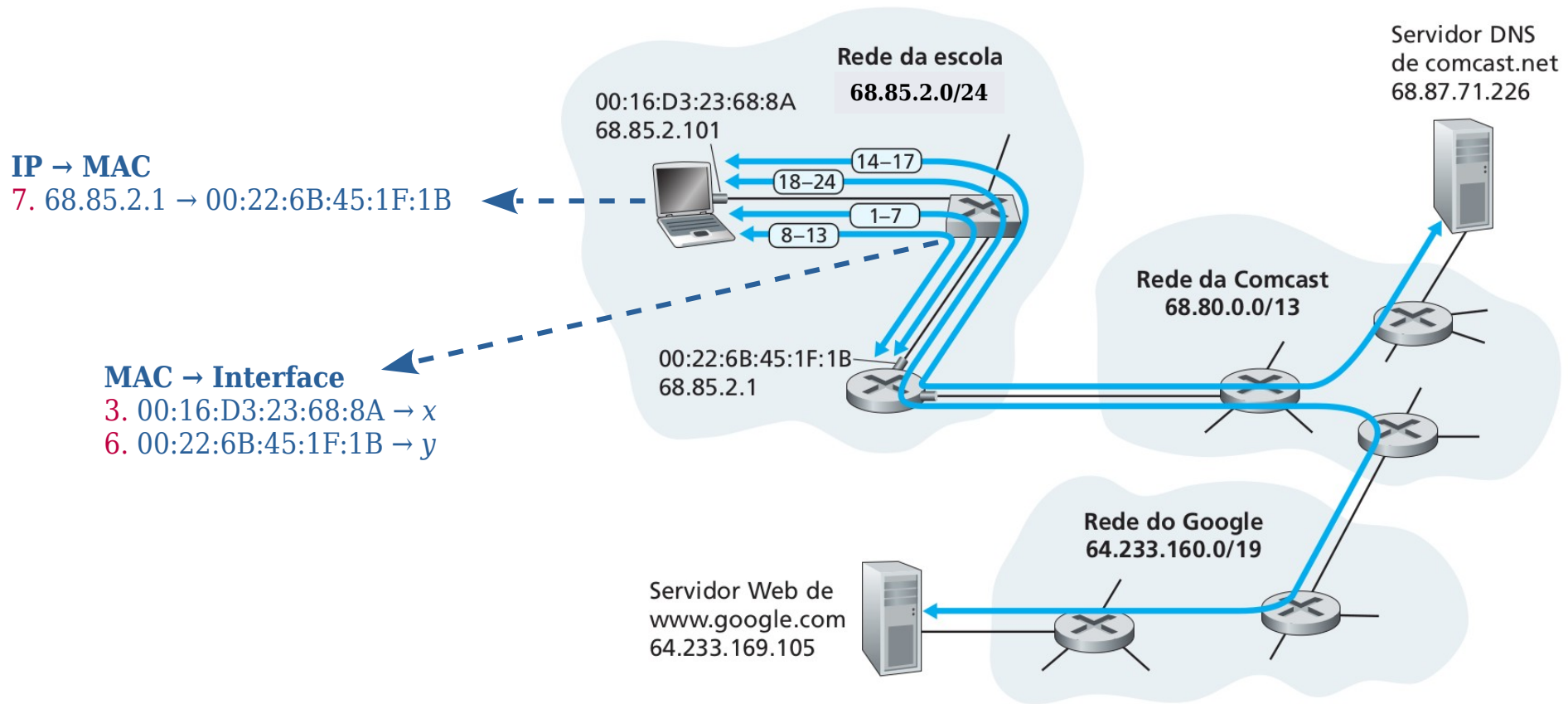


Um dia na vida de uma solicitação de página Web



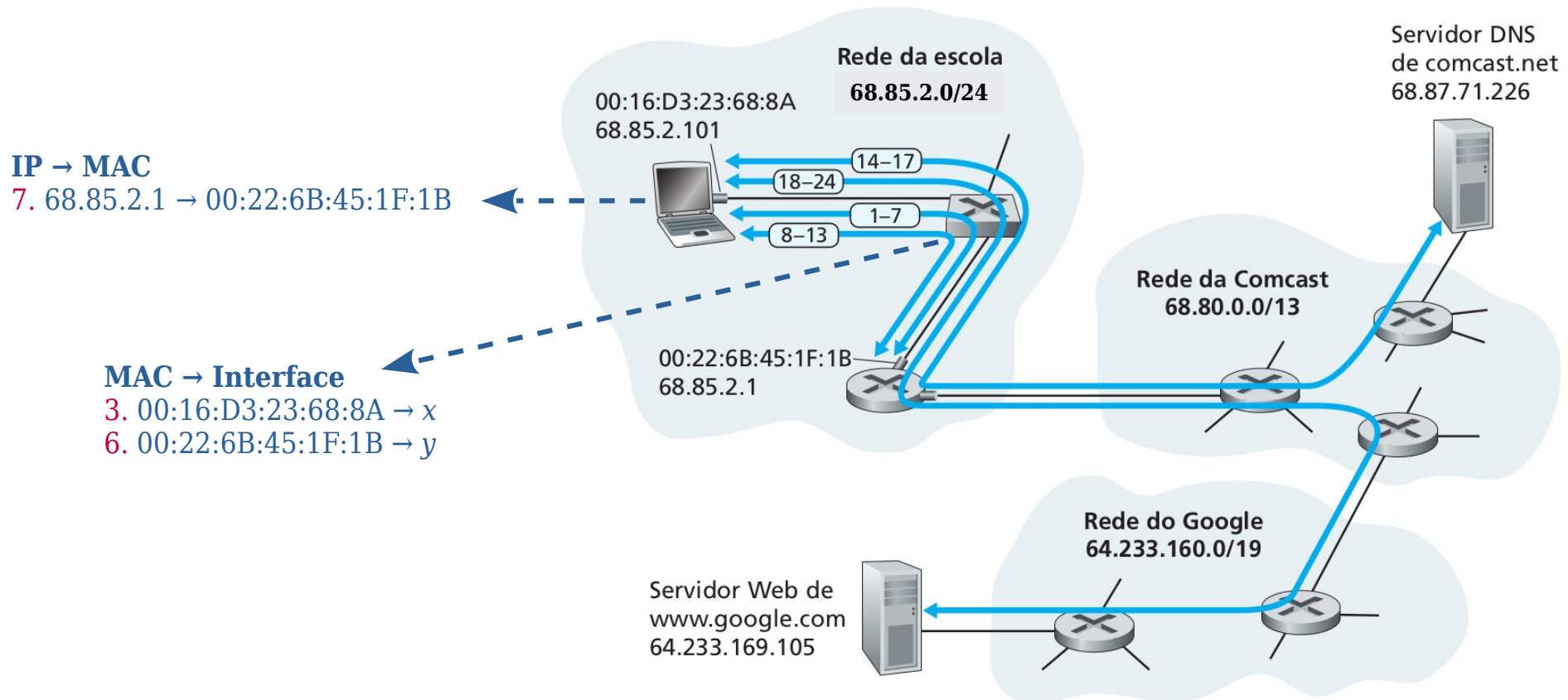
1. O cliente cria uma mensagem de solicitação DHCP. A mensagem é colocada em um segmento UDP (porta de origem 68, porta de destino 67). O segmento UDP é colocado em um datagrama IP (IP de origem 0.0.0.0, IP de destino 255.255.255.255).
2. O datagrama IP é colocado em um quadro Ethernet (MAC de origem 00:16:D3:23:68:8A, MAC de destino FF:FF:FF:FF:FF:FF).
3. O quadro Ethernet é enviado ao comutador. O comutador 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

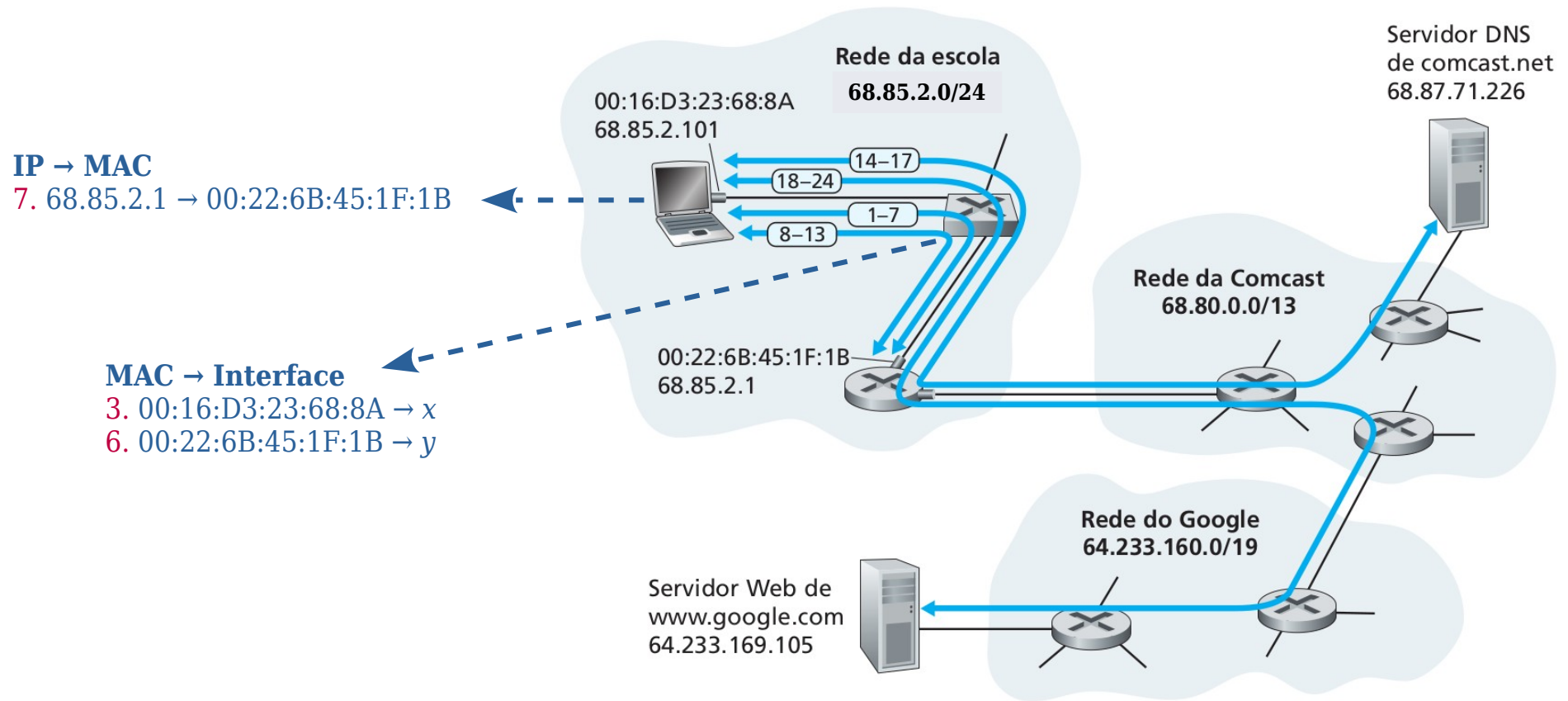


5. O servidor DHCP atribui um endereço IP ao cliente e cria uma mensagem DHCP (ACK) contendo:

- 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).

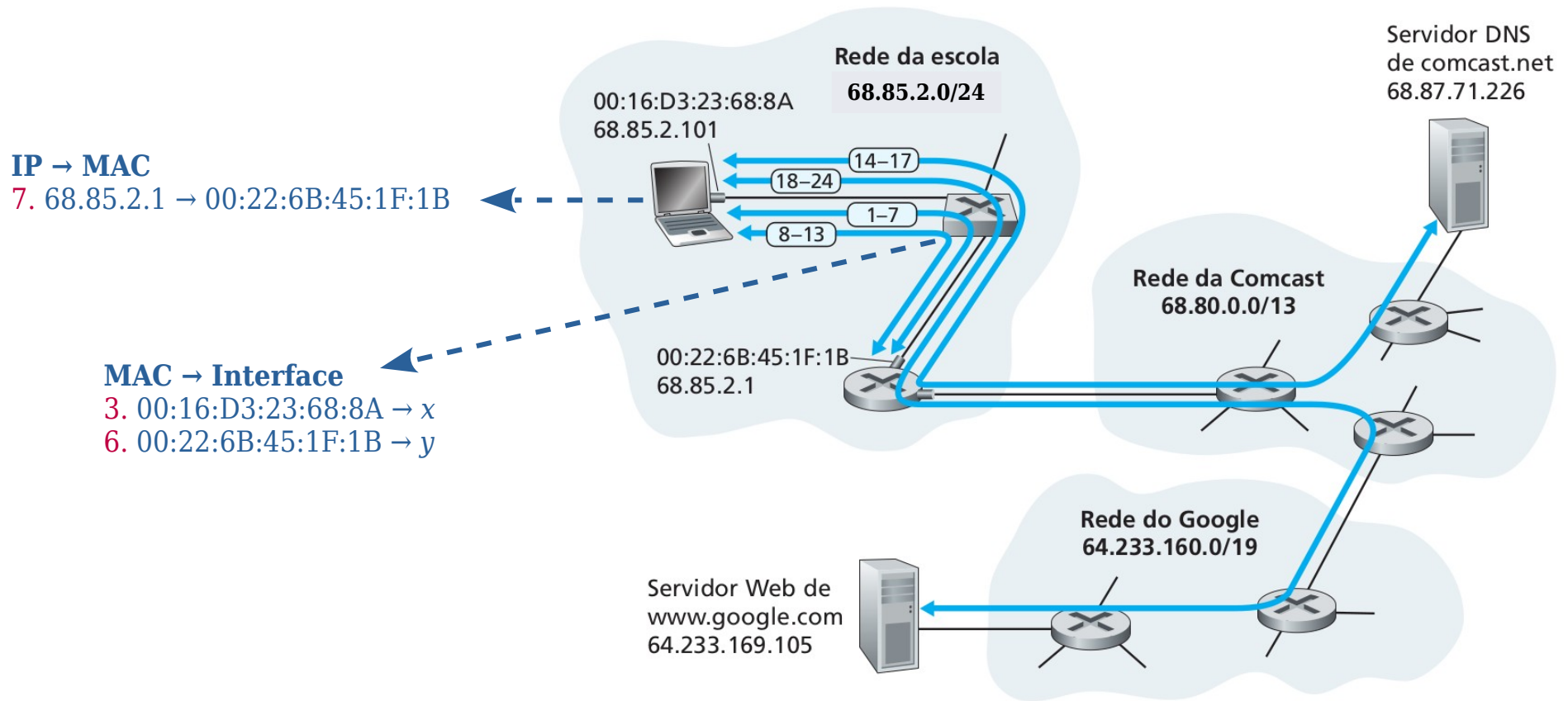
Um dia na vida de uma solicitação de página Web



6. O quadro Ethernet é enviado ao comutador. O comutador 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 comutador 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 resposta DHCP e, finalmente, configura sua interface de rede. O cliente também adiciona um registro em sua tabela ARP contendo o mapeamento: IP 68.85.2.1 → MAC 00:22:6B:45:1F:1B

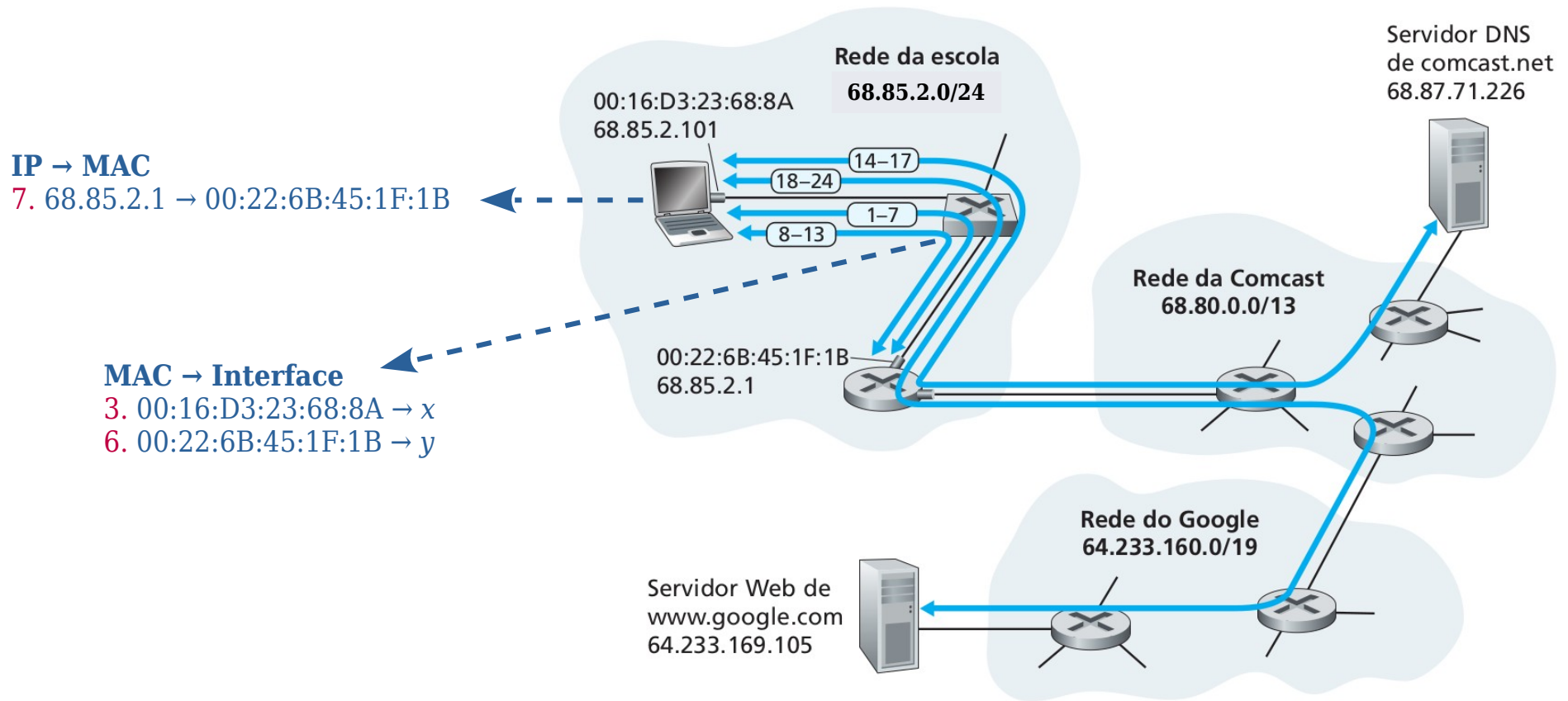
Um dia na vida de uma solicitação de página Web



8. 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).

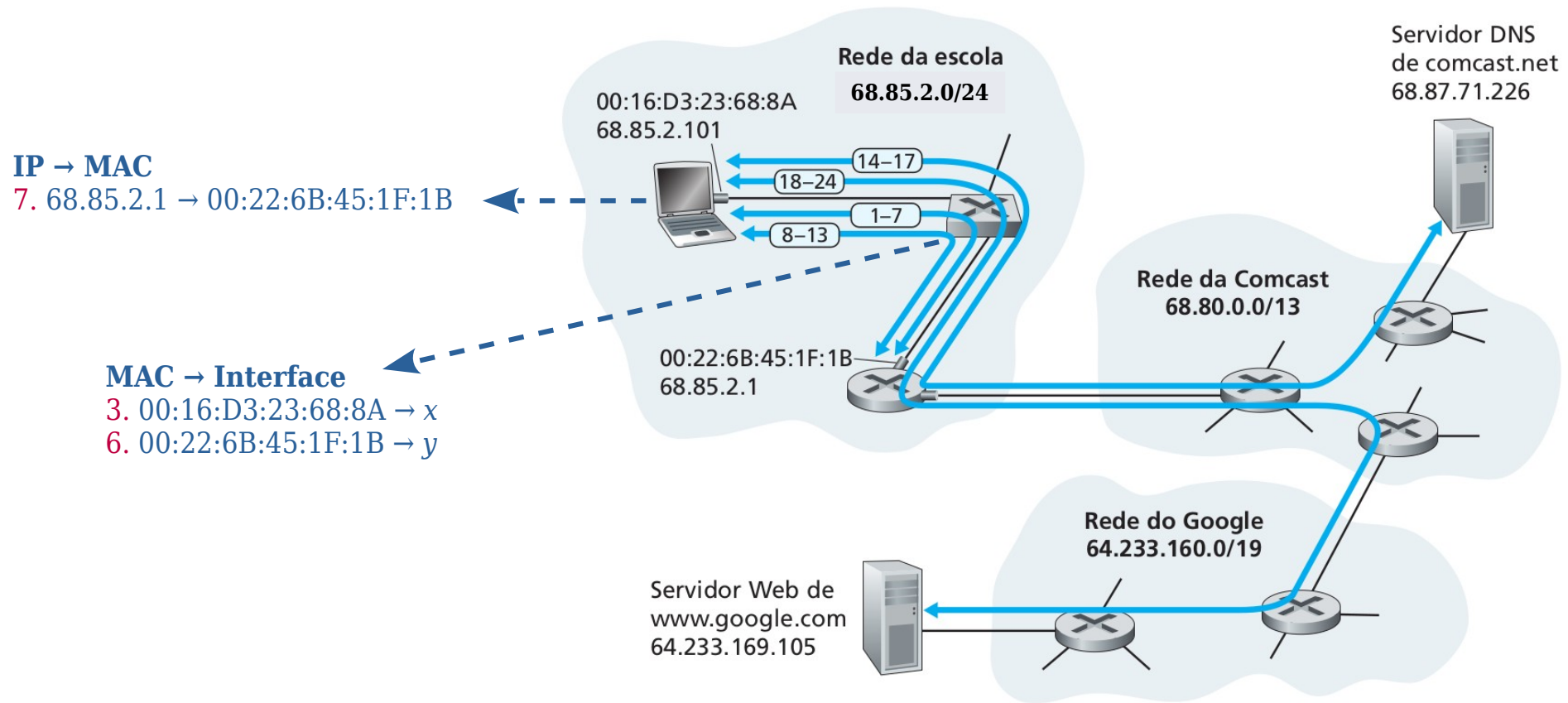
Um dia na vida de uma solicitação de página Web



10. A tabela ARP no cliente já contém um registro de entrada que faz o mapeamento do IP do gateway para o MAC do gateway, mas vamos imaginar que tal informação ainda não exista. 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 comutador.

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 comutador.

Um dia na vida de uma solicitação de página Web

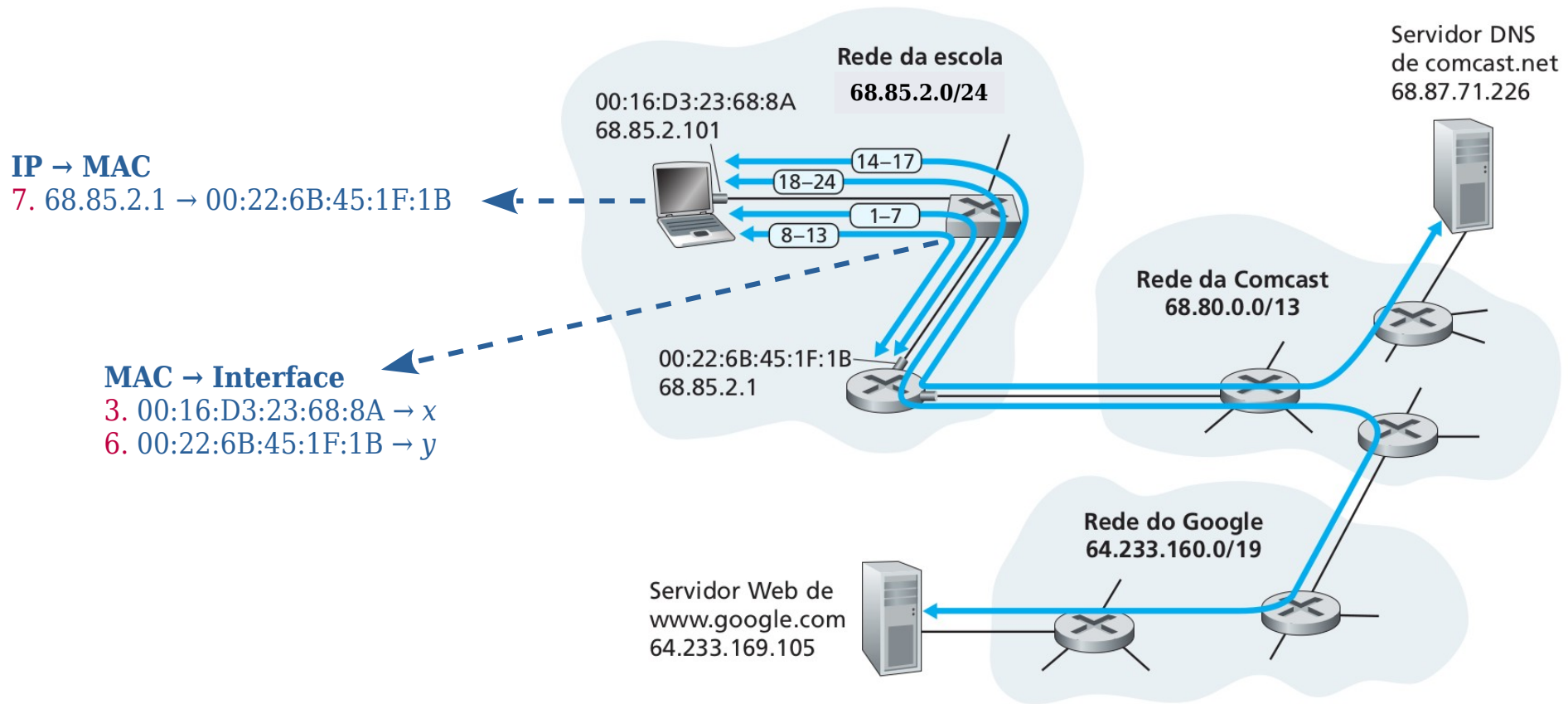


12. O cliente recebe o quadro Ethernet contendo a resposta ARP e extrai o endereço MAC do gateway. Neste caso o cliente adicionaria em sua tabela ARP o mapeamento:

IP 68.85.2.1 → MAC 00:22:6B:45:1F:1B

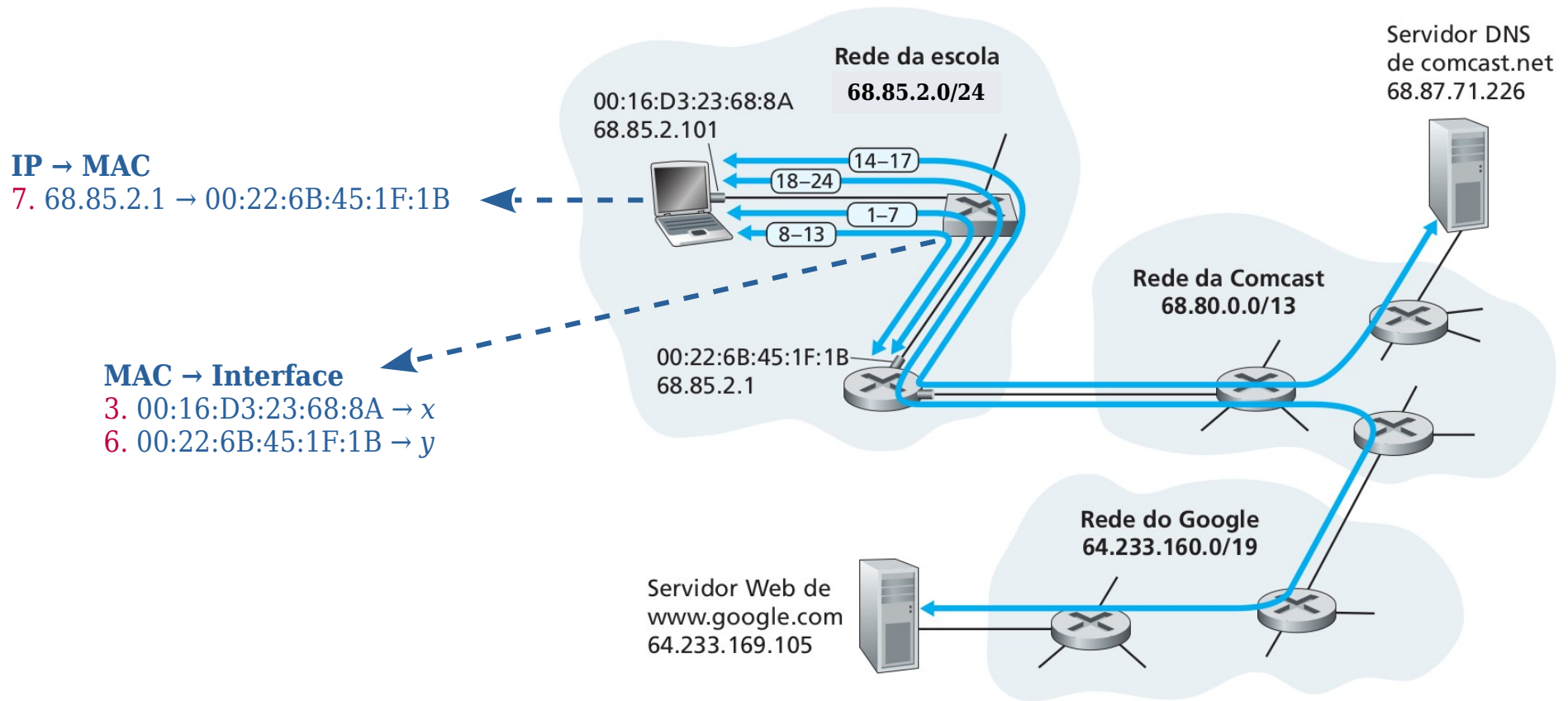
13. Finalmente o cliente pode completar o quadro Ethernet com a mensagem de consulta DNS de modo a conter o endereço MAC do gateway. O quadro é então enviado ao comutador da rede.

Um dia na vida de uma solicitação de página Web



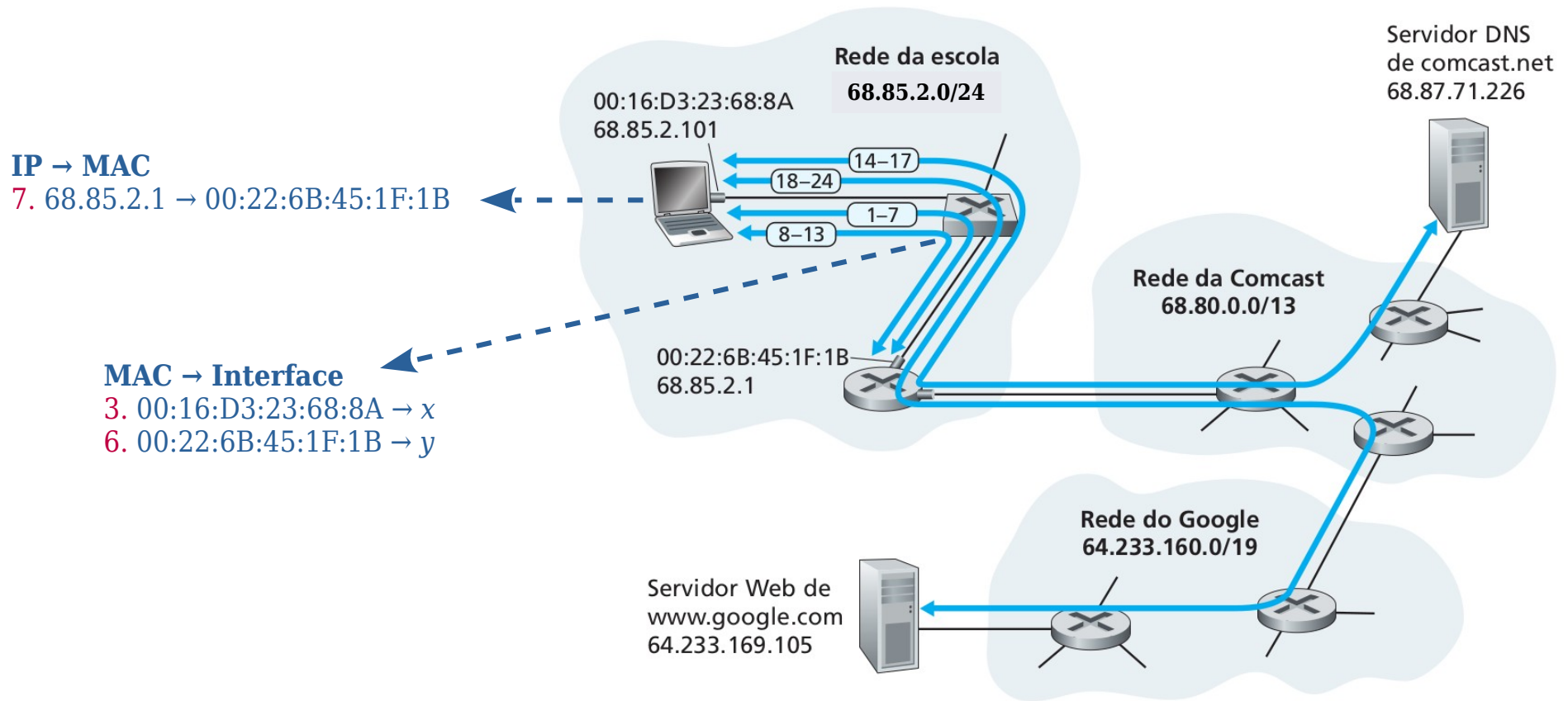
14. O gateway recebe o quadro e extrai o datagrama IP que contém a consulta DNS. O roteador procura o endereço de destino desse datagrama (IP 68.87.71.226) e determina a partir de sua tabela de repasses para qual roteador da rede Comcast ele deve ser encaminhado. O datagrama IP é colocado em um quadro 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 repasses, 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.

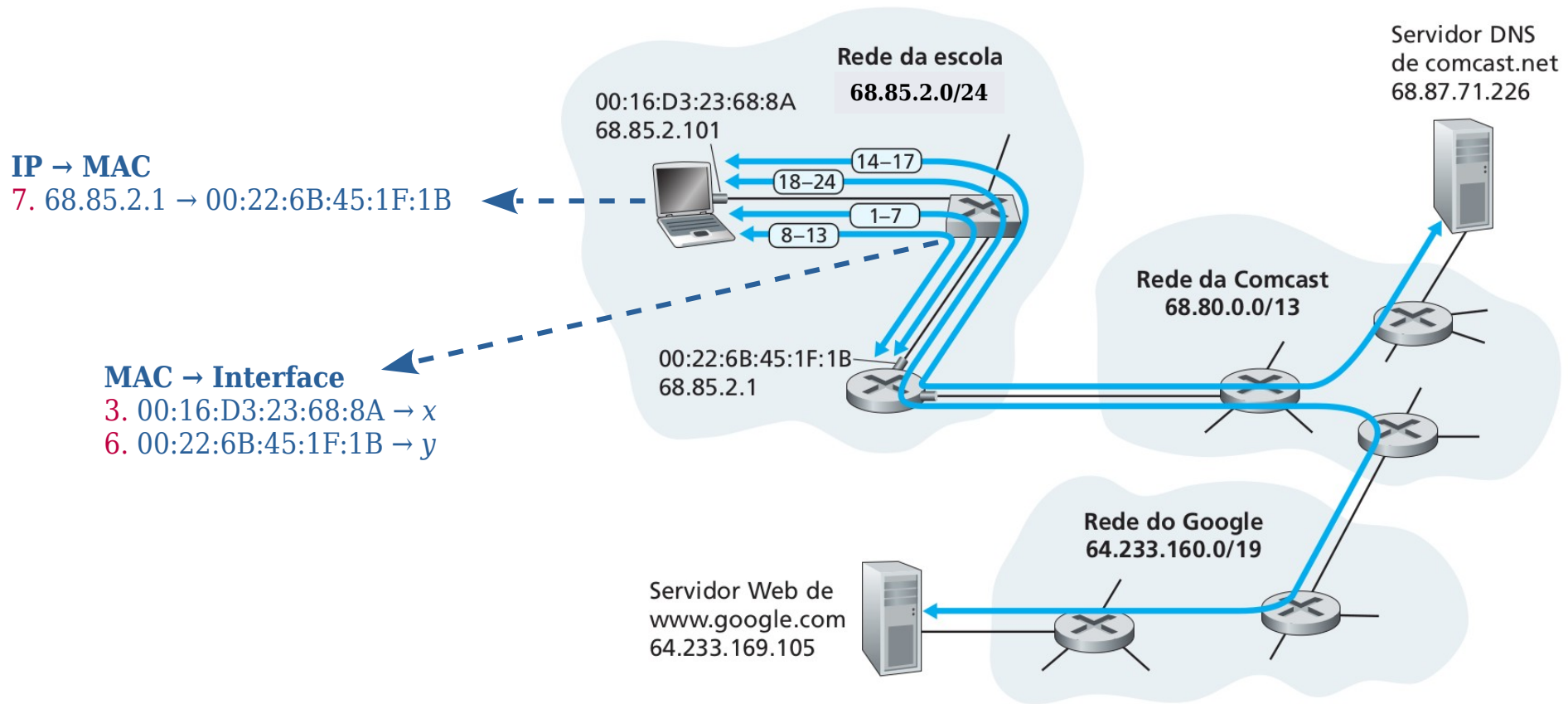
Um dia na vida de uma solicitação de página Web



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".

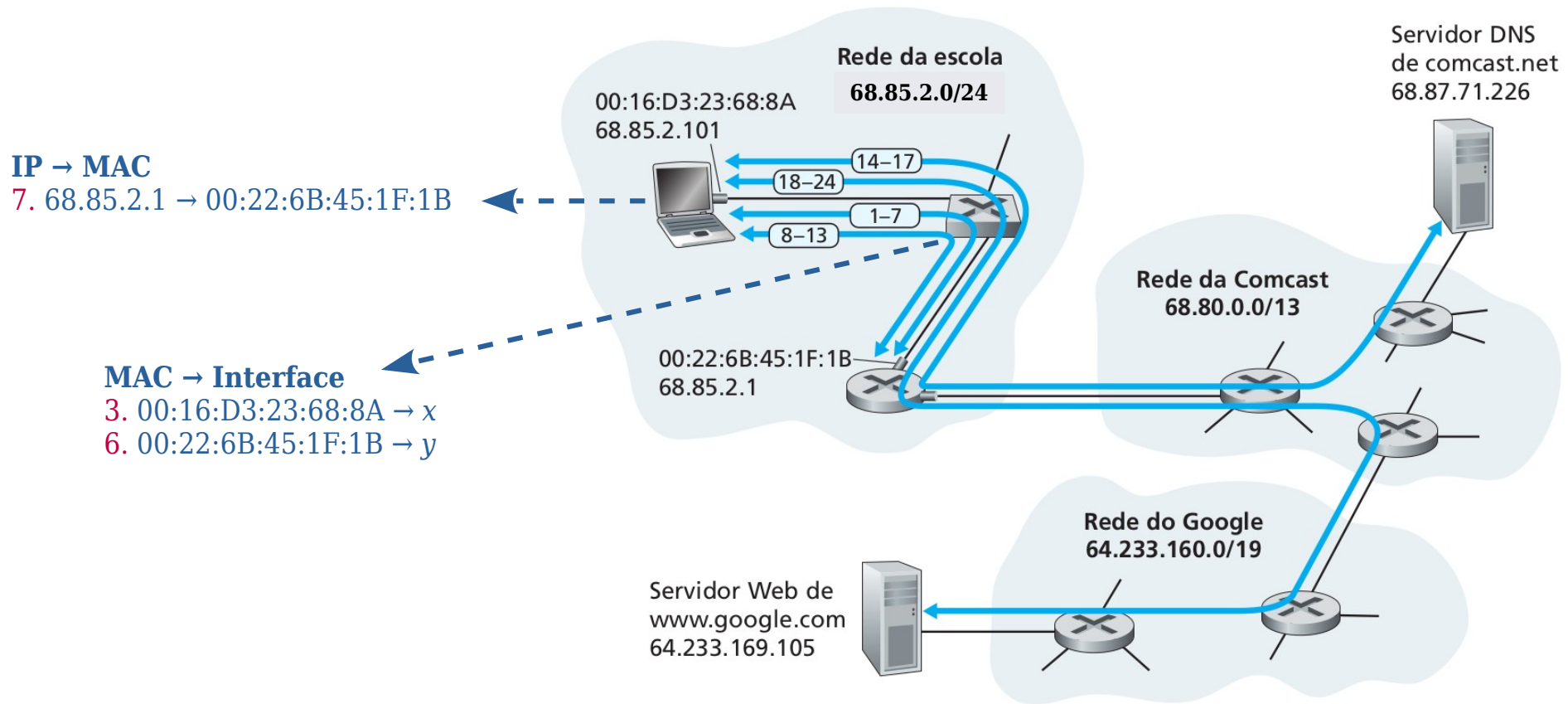
Um dia na vida de uma solicitação de página Web



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 comutador.

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

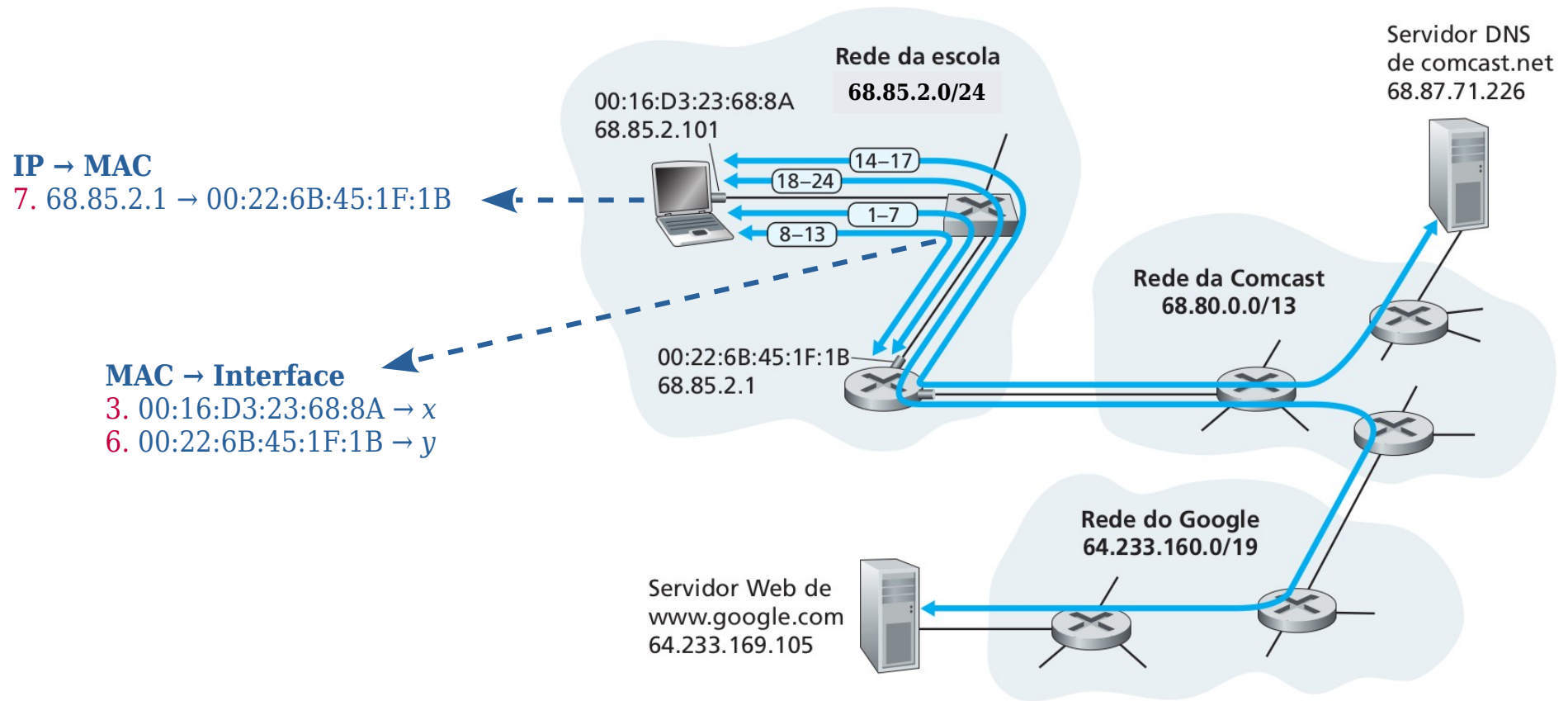
Um dia na vida de uma solicitação de página Web



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 é encaminhado pelos roteadores até chegar ao cliente, onde é entregue ao socket TCP criado pelo cliente, que entra em estado de conexão.

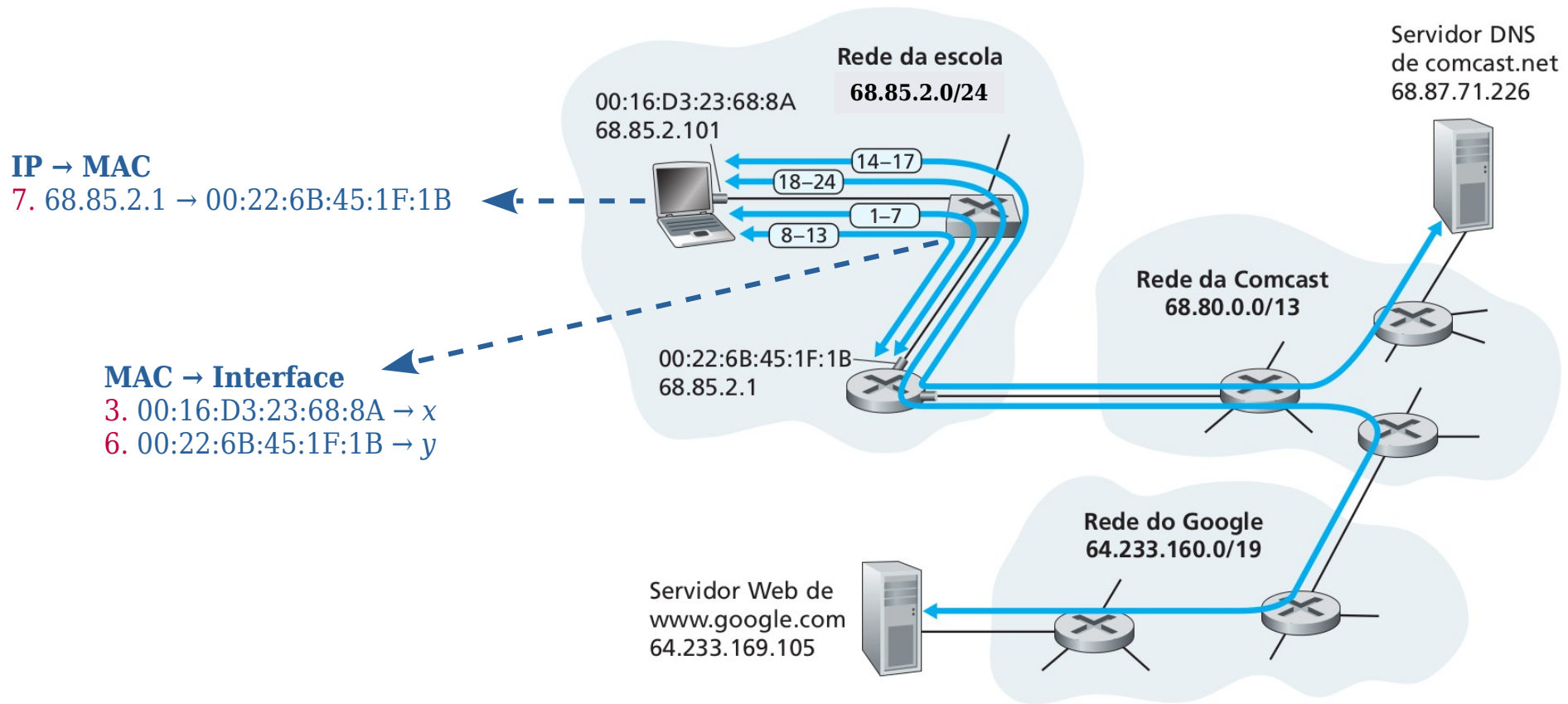
Um dia na vida de uma solicitação de página Web



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?

