Redes de Computadores

Redes Sem Fio e Redes Móveis

Fabricio Breve
www.fabriciobreve.com

Nota: a maioria dos slides dessa apresentação são traduzidos ou adaptados dos slides disponibilizados gratuitamente pelos autores do livro KUROSE, James F. e ROSS, Keith W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 8th Edition. Pearson, 2020. Todo o material pertencente aos seus respectivos autores está protegido por direito autoral.

Chapter 7
Wireless and Mobile Networks

A note on the use of these PowerPoint slides:

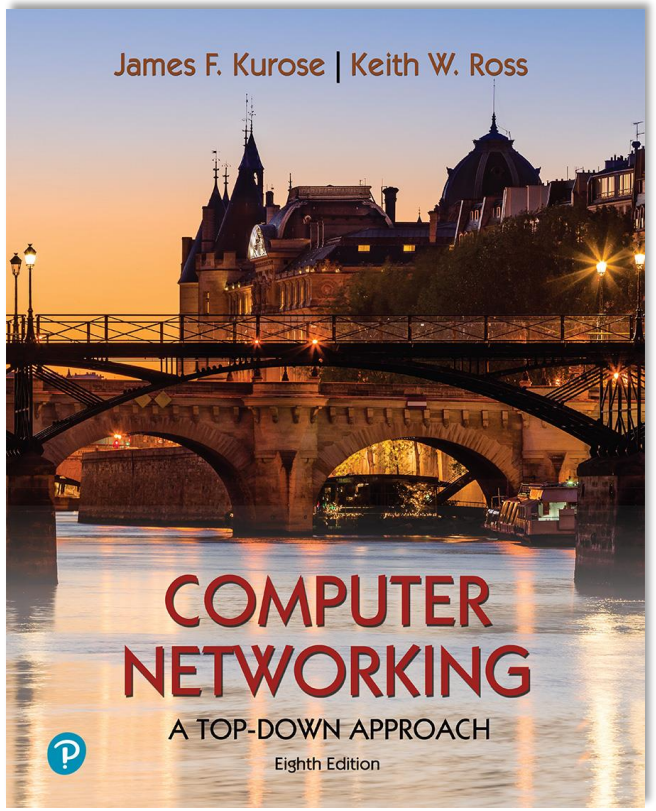
We're making these slides freely available to all (faculty, students, readers). They're in PowerPoint form so you see the animations; and can add, modify, and delete slides (including this one) and slide content to suit your needs. They obviously represent a *lot* of work on our part. In return for use, we only ask the following:

- If you use these slides (e.g., in a class) that you mention their source (after all, we'd like people to use our book!)
- If you post any slides on a www site, that you note that they are adapted from (or perhaps identical to) our slides, and note our copyright of this material.

For a revision history, see the slide note for this page.

Thanks and enjoy! JFK/KWR

All material copyright 1996-2020
J.F Kurose and K.W. Ross, All Rights Reserved



Computer Networking: A Top-Down Approach

8th edition
Jim Kurose, Keith Ross
Pearson, 2020

Redes Sem Fio e Redes Móveis: contexto

- mais assinantes de telefones sem fio (móveis) do que assinantes de telefones fixos (com fio) (10 para 1 em 2019)!
- mais dispositivos conectados por banda larga móvel do que dispositivos conectados por banda larga fixa (5 para 1 em 2019)!
  - Redes celulares 4G/5G agora adotando a pilha de protocolos da Internet, incluindo SDN
- dois desafios importantes (mas diferentes)
  - sem fio: comunicação por enlace sem fio
  - mobilidade: lidar com o usuário móvel que muda o ponto de conexão com a rede

Capítulo 7: roteiro

- Introdução

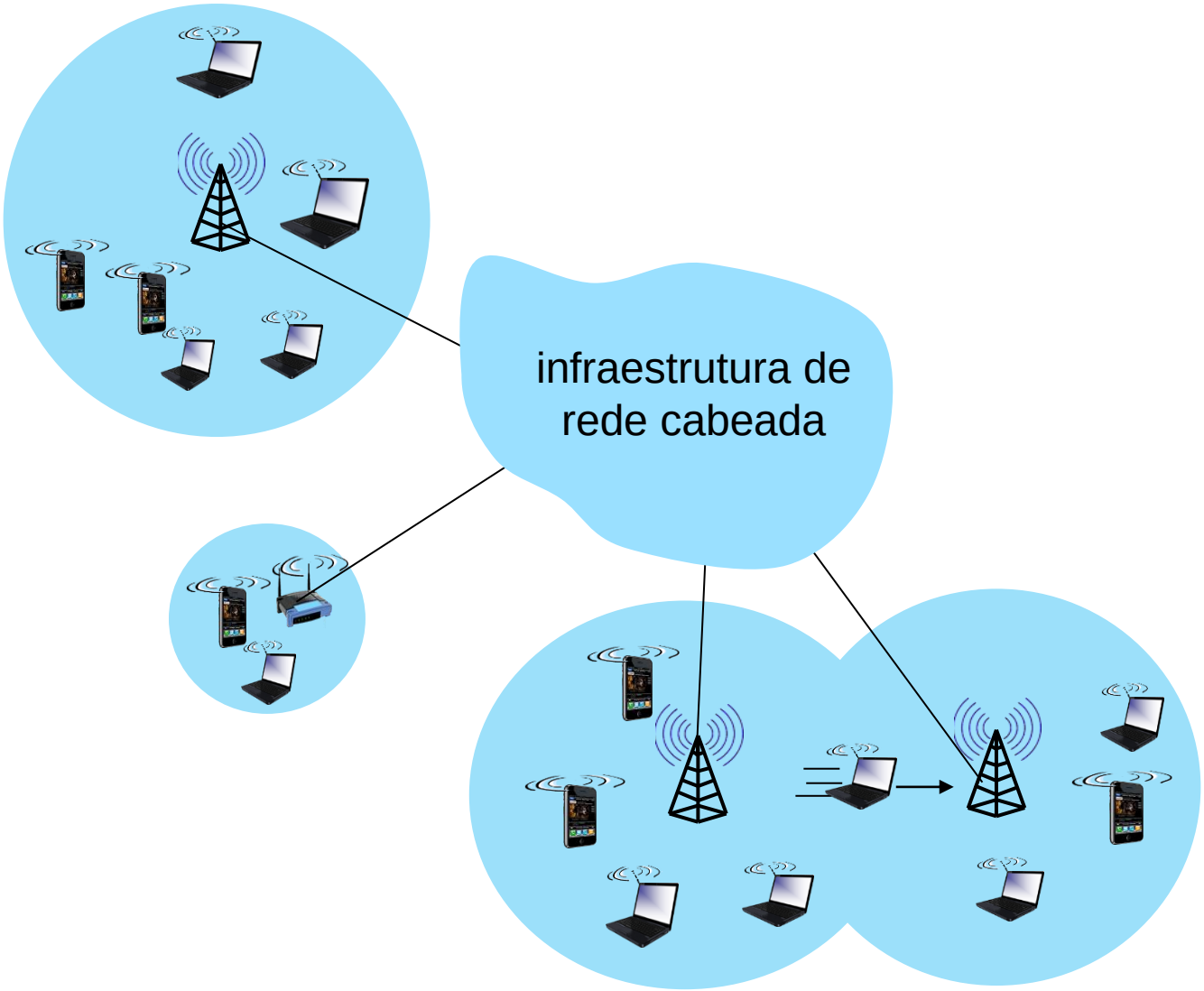
Sem Fio

- Enlaces Sem Fio e características de rede
- WiFi: LANs sem fio 802.11
- Redes Celulares: 4G e 5G

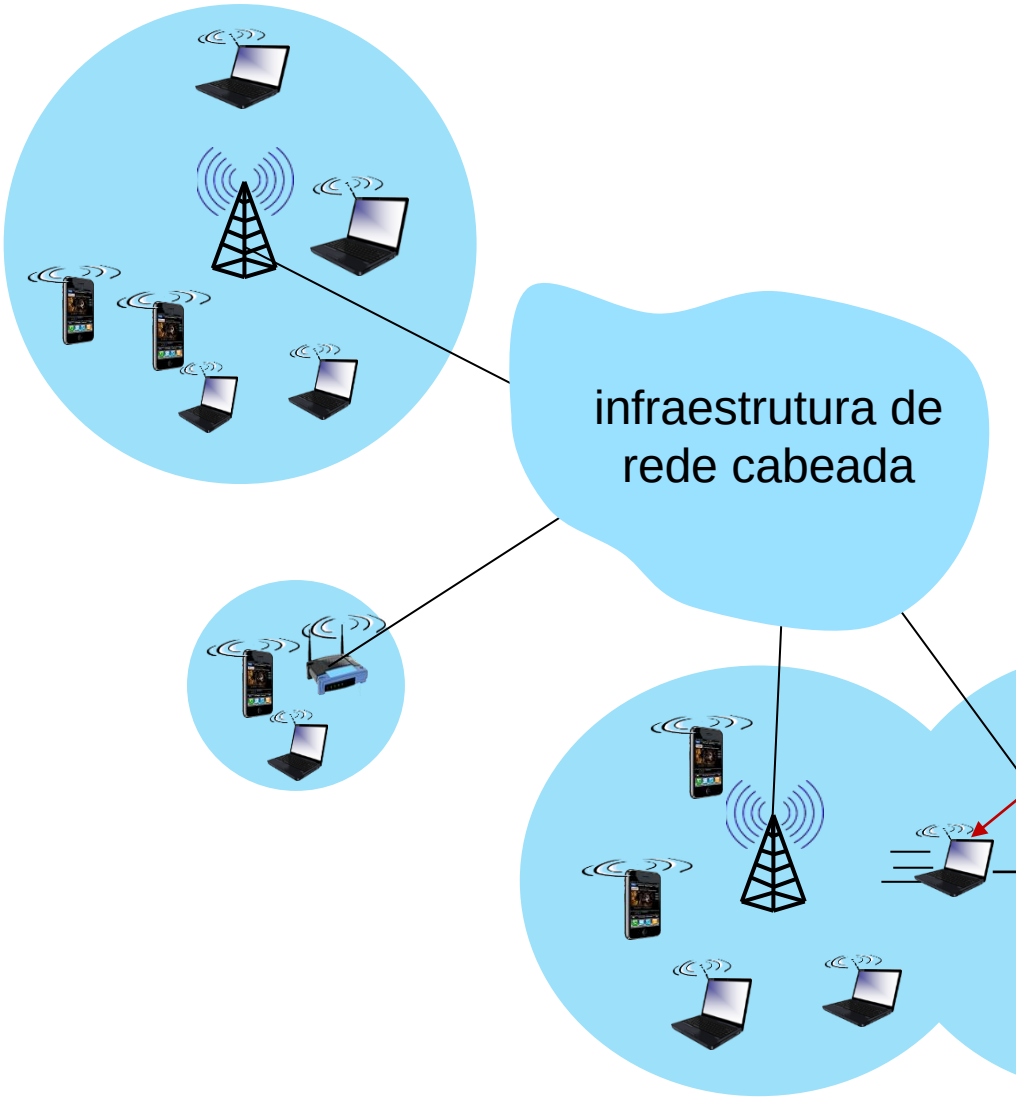
Mobilidade

- Gestão da mobilidade: princípios
- Gestão da mobilidade: prática
  - Redes 4G/5G
  - IP Móvel
- Mobilidade: impacto em protocolos de camadas superiores

Elementos de uma rede sem fio



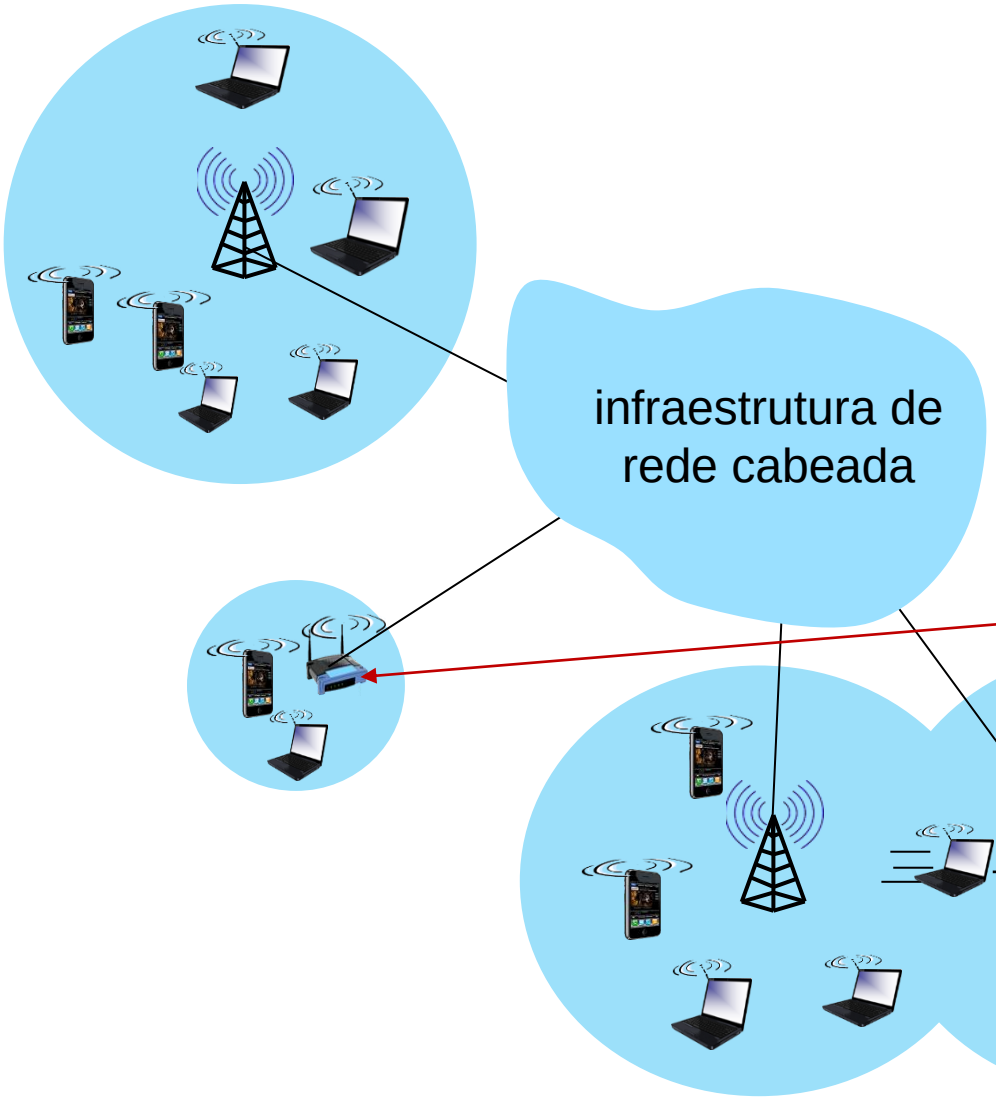
Elementos de uma rede sem fio



hospedeiros sem fio

- laptop, smartphone, IoT
- executam aplicações
- pode ser estacionário (não móvel) ou móvel
  - sem fio *nem* sempre significa mobilidade!

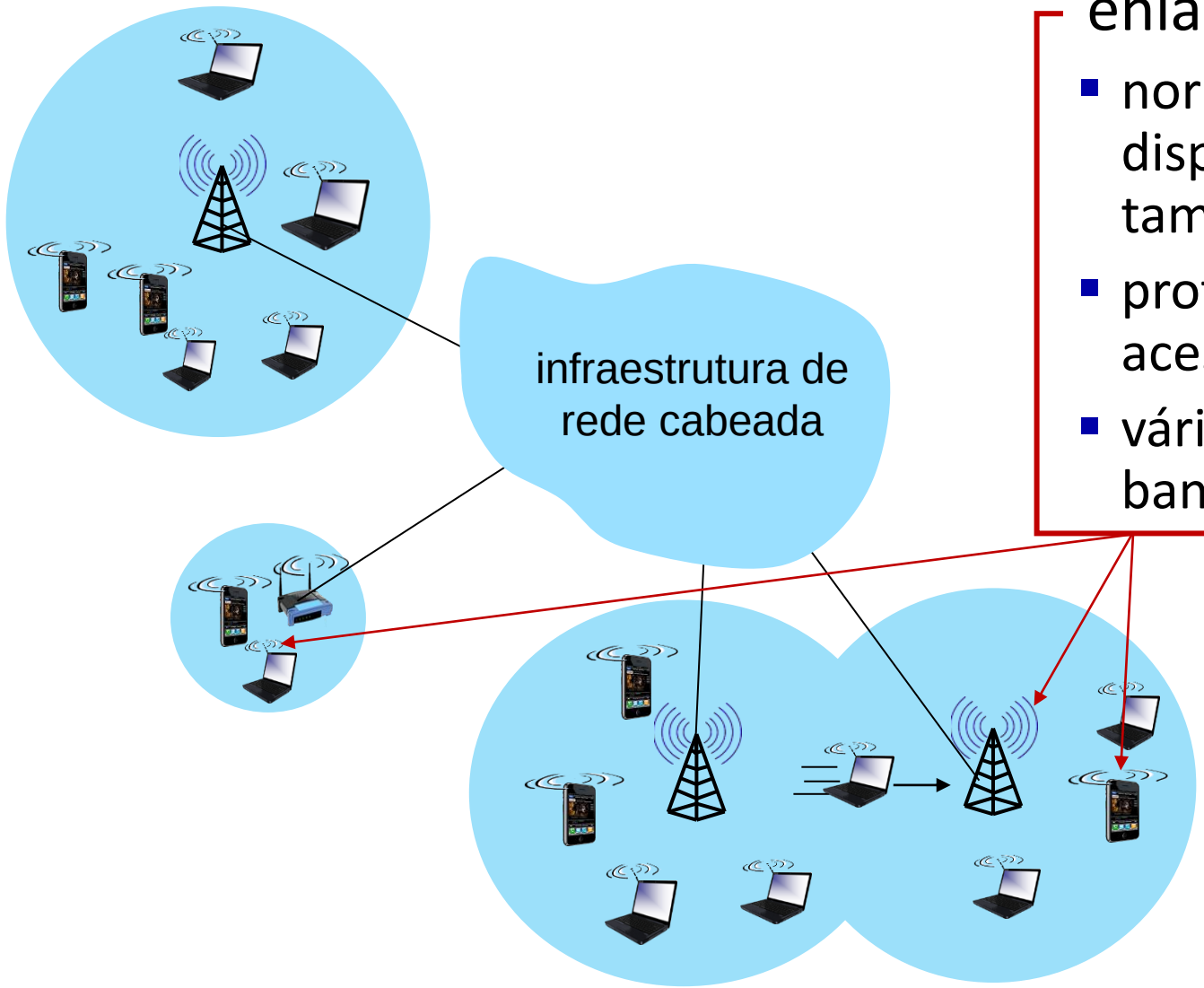
Elementos de uma rede sem fio



estação base

- normalmente conectada à rede com fio
- relay - responsável pelo envio de pacotes entre a rede cabeada e o(s) hospedeiro(s) sem fio em sua “área”
  - por exemplo, torres de celular, pontos de acesso 802.11

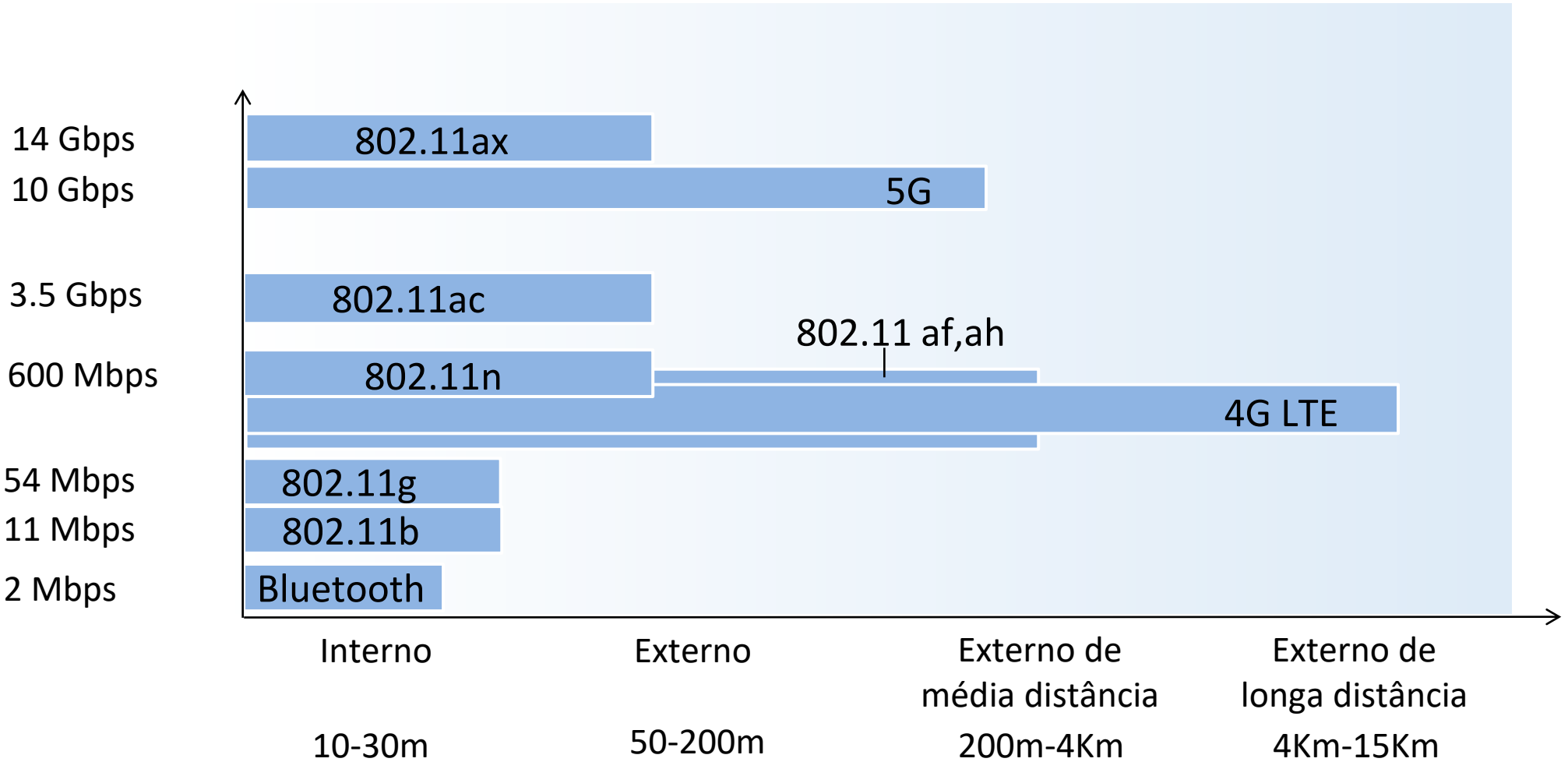
Elementos de uma rede sem fio



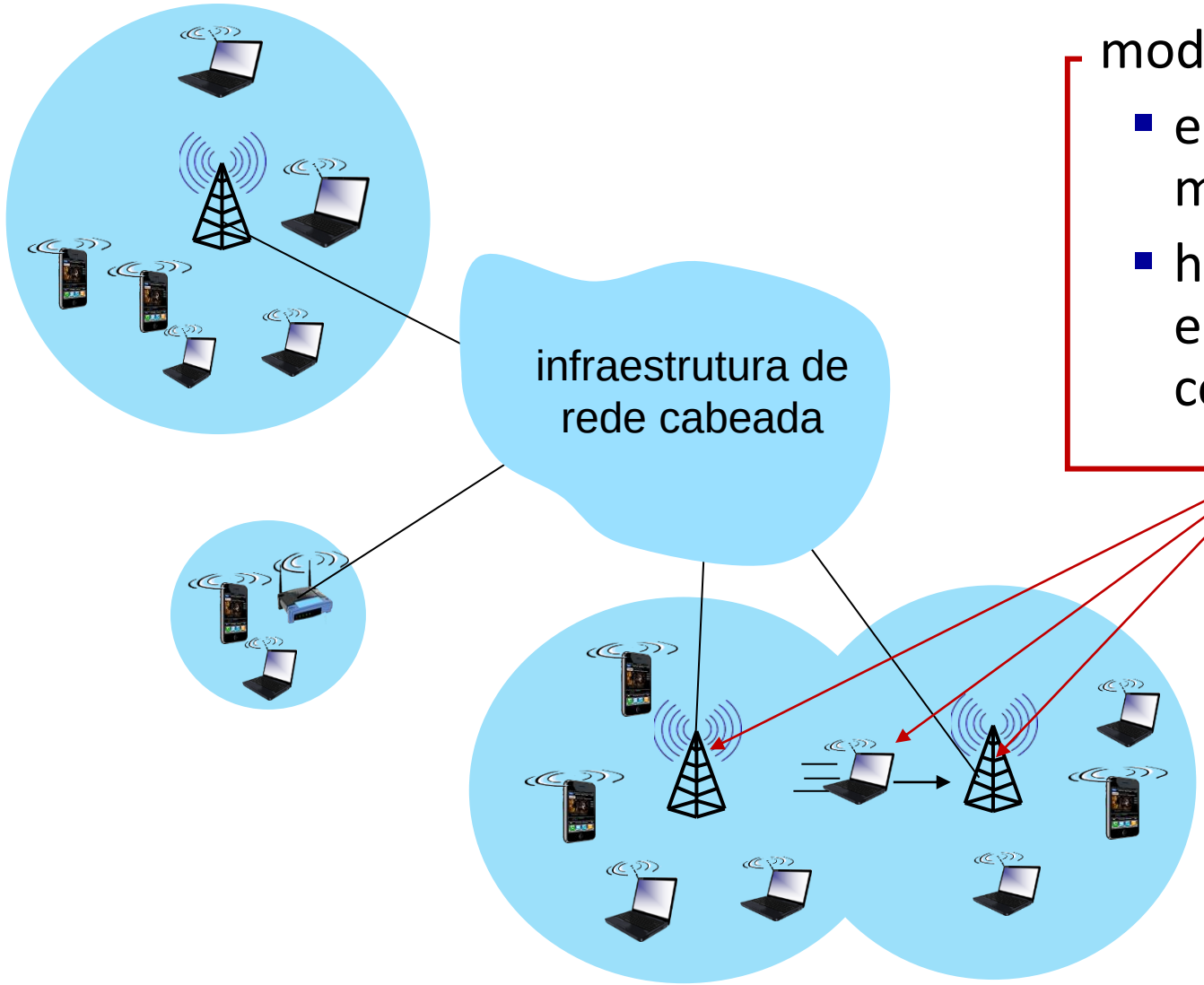
enlace sem fio

- normalmente usado para conectar dispositivos móveis à estação base, também usado como enlace de backbone
- protocolo de acesso múltiplo coordena acesso ao enlace
- várias taxas de transmissão, distâncias, e bandas de frequência

Características de enlaces sem fio selecionados



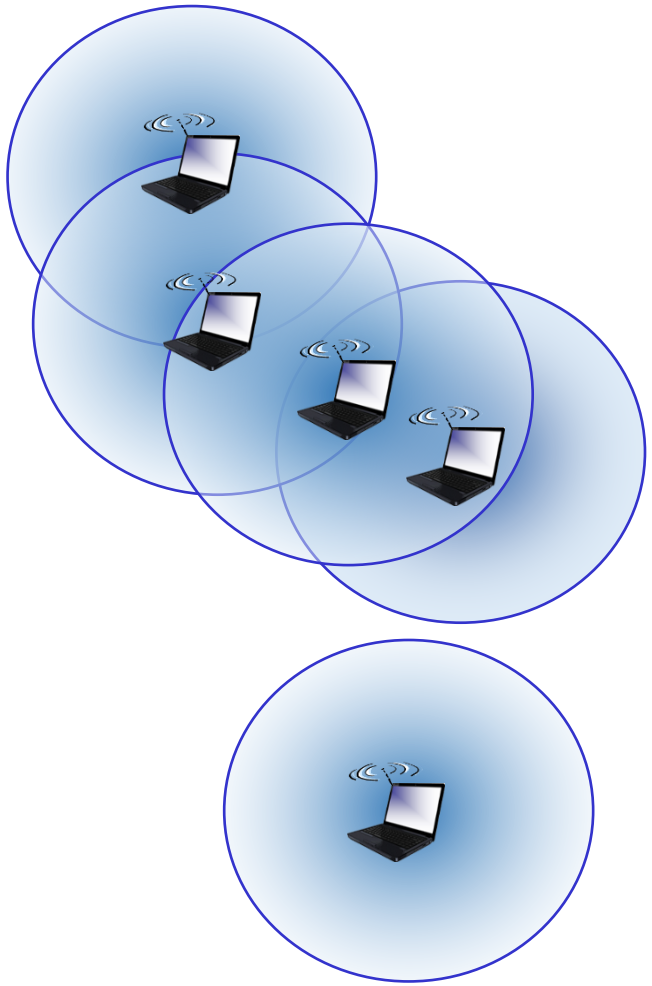
Elementos de uma rede sem fio



modo infraestrutura

- estação base conecta dispositivos móveis em rede cabeada
- handoff: dispositivo móvel muda de estação base que está fornecendo conexão em rede cabeada

Elementos de uma rede sem fio



modo ad hoc

- sem estações base
- os nós só podem transmitir para outros nós dentro da cobertura do enlace
- nós se auto organizam em uma rede: roteiam entre si

Taxonomia de rede sem fio

	único salto	múltiplos saltos
infraestrutura (ex.: APs)	hospedeiro se conecta à estação base (WiFi, celular) que se conecta à Internet maior	hospedeiro pode ter que retransmitir através de vários nós sem fio para se conectar à Internet maior: *rede mesh*
sem infraestrutura	sem estação base, sem conexão com Internet maior (Bluetooth, redes ad hoc)	sem estação base, sem conexão com a Internet maior. Pode ter que retransmitir para alcançar outro determinado nó sem fio MANET, VANET

Capítulo 7: roteiro

- Introdução

Sem Fio

- Enlaces Sem Fio e características de rede
- WiFi: LANs sem fio 802.11
- Redes Celulares: 4G e 5G

Mobilidade

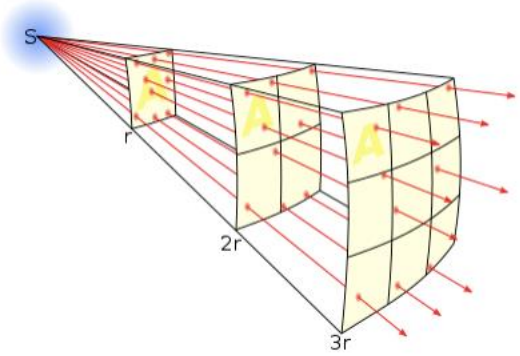
- Gestão da mobilidade: princípios
- Gestão da mobilidade: prática
  - Redes 4G/5G
  - IP Móvel
- Mobilidade: impacto em protocolos de camadas superiores

Características de enlaces sem fio: desvanecimento (atenuação)

O sinal de rádio sem fio atenua (perde energia) à medida que se propaga ("perda de caminho" no espaço livre)

Perda de caminho no espaço livre ~ $(fd)^2$

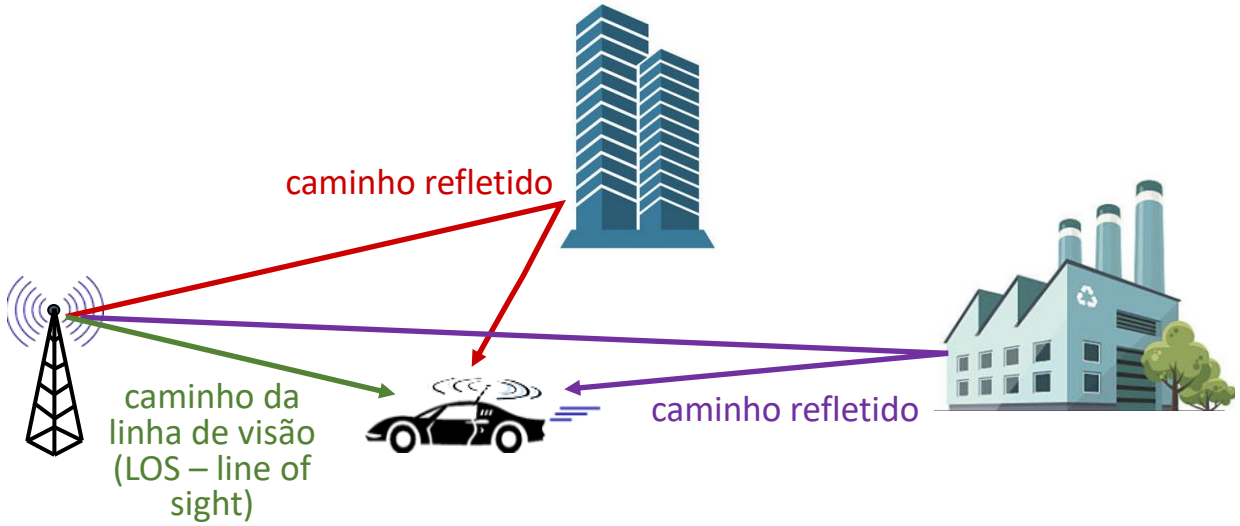
f: frequência
d: distância



frequência mais alta ou distância mais longa → maior perda de caminho no espaço livre

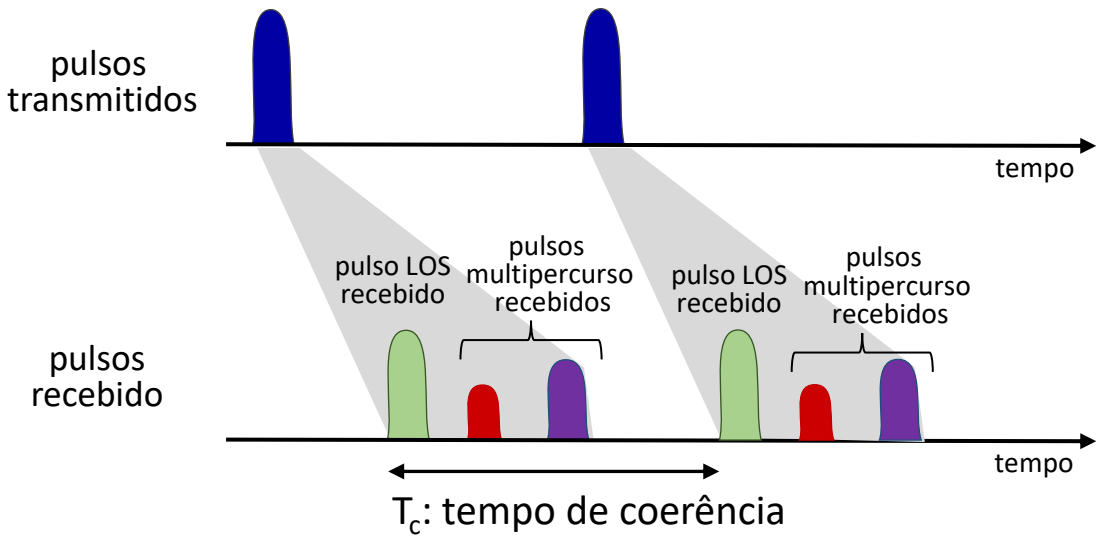
Características de enlaces sem fio: multicaminho

propagação multipercurso: o sinal de rádio reflete nos objetos, no solo, no ambiente construído, chegando ao destino em momentos ligeiramente diferentes



Características de enlaces sem fio: multicaminho

propagação multipercurso: o sinal de rádio reflete nos objetos, no solo, no ambiente construído, chegando ao destino em momentos ligeiramente diferentes

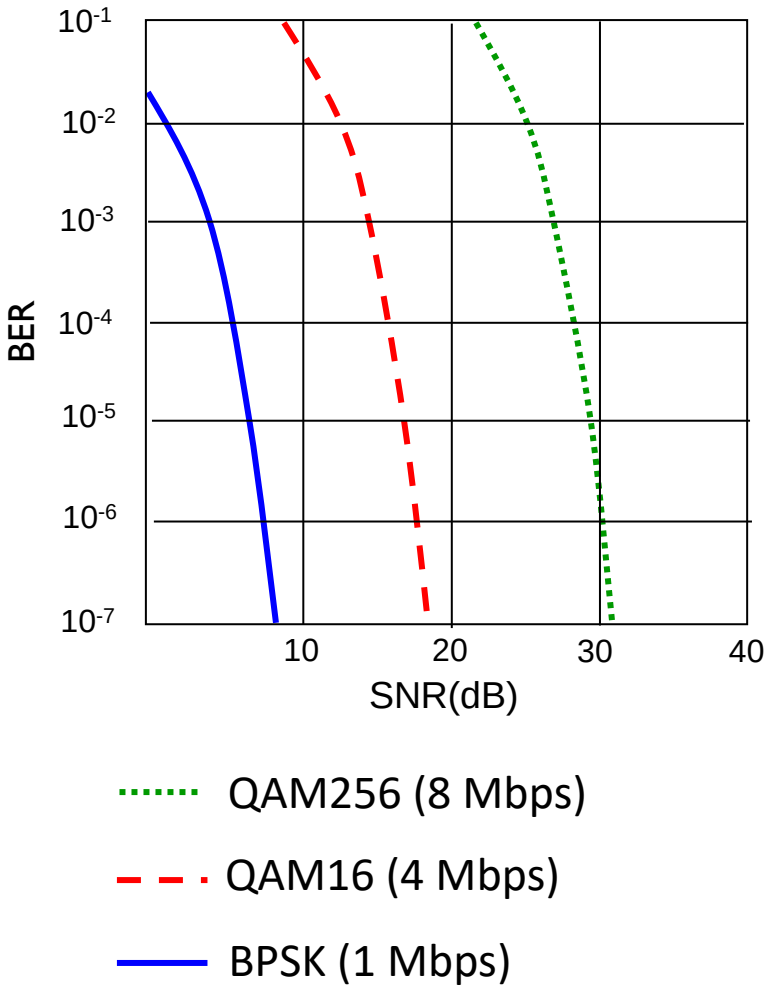


Tempo de coerência:

- quantidade de tempo que o bit está presente no canal para ser recebido
- influencia a taxa de transmissão máxima possível, uma vez que os tempos de coerência não podem se sobrepor
- inversamente proporcional a
  - frequência
  - velocidade do receptor

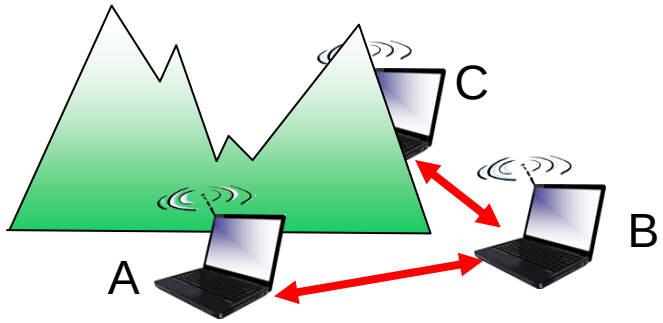
Características de enlaces sem fio: ruído

- interferência de outras fontes nas frequências da rede sem fio: motores, eletrodomésticos
- SNR: signal-to-noise ratio (relação sinal-ruído)
  - SNR maior – mais fácil de extrair sinal do ruído (uma "coisa boa")
- Comprometimento SNR versus BER
  - *dada camada física:* aumentar potência -> aumenta SNR -> diminui BER
  - A SNR pode mudar com a mobilidade: adaptar dinamicamente a camada física (técnica de modulação, taxa)



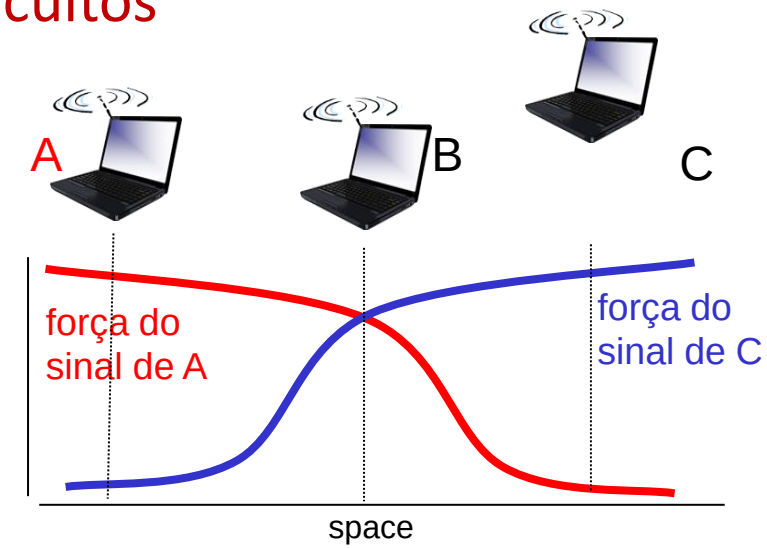
Características de enlaces sem fio: terminais ocultos

Problema do terminal oculto



- B e A ouvem um ao outro
- B e C ouvem um ao outro
- A e C não podem ouvir um ao outro, o que significa que A e C podem causar interferência em B

Atenuação também causa "terminais ocultos"



- B e A ouvem um ao outro
- B e C ouvem um ao outro
- A e C não podem ouvir um ao outro interferindo em B

Capítulo 7: roteiro

- Introdução

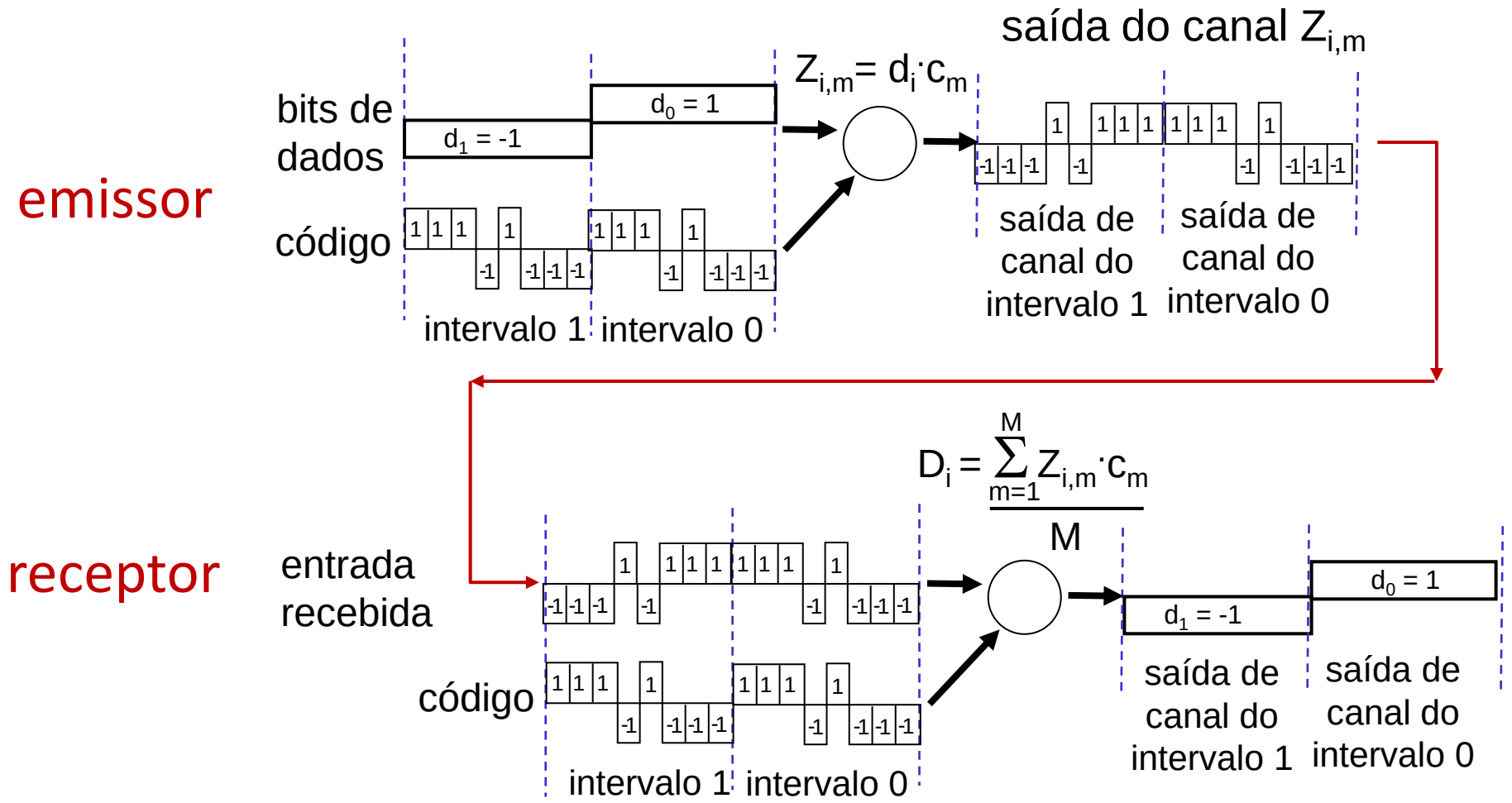
Sem Fio

- Enlaces Sem Fio e características de rede
- CDMA: code division multiple access
- WiFi: LANs sem fio 802.11
- Bluetooth

Code Division Multiple Access (CDMA - Acesso Múltiplo por Divisão de Código)

- "código" único atribuído a cada usuário; ou seja, particionamento por conjunto de códigos
  - todos os usuários compartilham a mesma frequência, mas cada usuário tem sua própria sequência de "chipping" (ou seja, código) para codificar dados
  - permite que vários usuários "coexistam" e transmitam simultaneamente com o mínimo de interferência (se os códigos forem "ortogonais")
- codificação: produto interno: (dados originais) X (sequência de chipping)
- decodificação: produto interno somado: (dados codificados) X (sequência de chipping)

Codificação/decodificação do CDMA

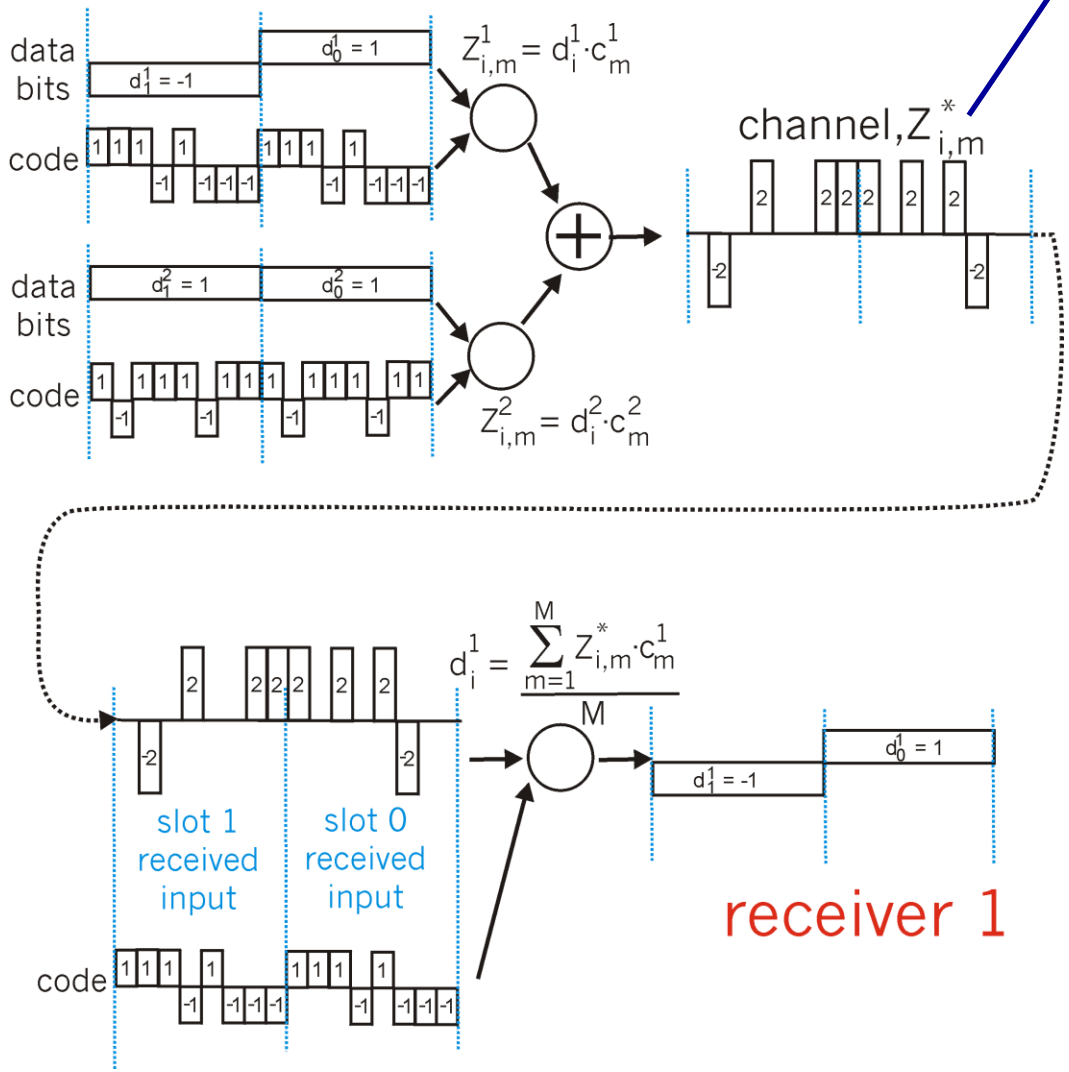


… mas isso não é realmente útil ainda!

CDMA: interferência de dois remetentes

Emissor 1

Emissor 2



canal soma as transmissões dos remetentes 1 e 2

usando o mesmo código do remetente 1, o receptor recupera os dados originais do remetente 1 a partir dos dados do canal somado!

… agora *isto é* útil!

Capítulo 7: roteiro

- Introdução

Sem Fio

- Enlaces Sem Fio e características de rede
- WiFi: LANs sem fio 802.11
- Redes Celulares: 4G e 5G

Mobilidade

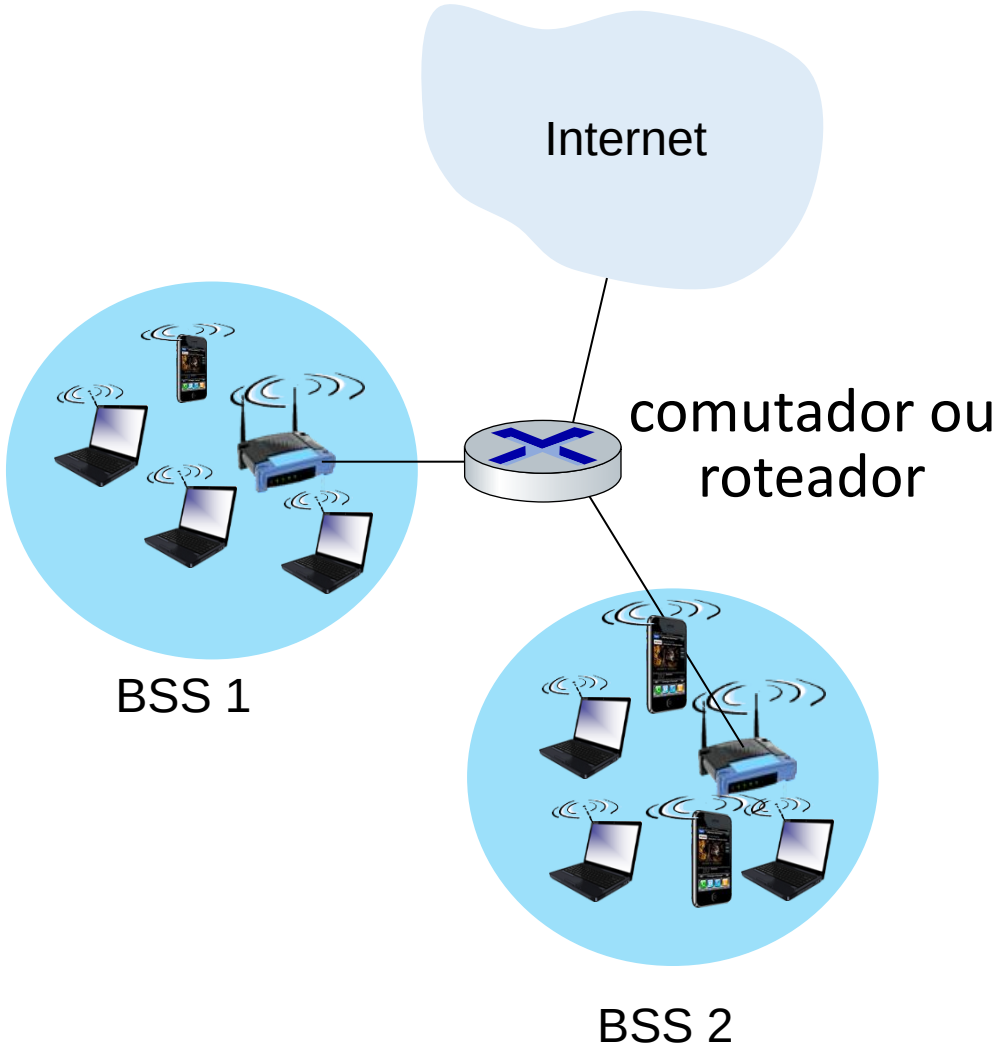
- Gestão da mobilidade: princípios
- Gestão da mobilidade: prática
  - Redes 4G/5G
  - IP Móvel
- Mobilidade: impacto em protocolos de camadas superiores

LAN Sem Fio IEEE 802.11

Padrão IEEE 802.11	Ano	Taxa máxima de dados	Alcance	Frequência
802.11b	1999	11 Mbps	30 m	2,4 GHz
802.11g	2003	54 Mbps	30m	2,4 GHz
802.11n (WiFi 4)	2009	600 Mbps	70m	2,4; 5 GHz
802.11ac (WiFi 5)	2013	3,47 Gpbs	70m	5 GHz
802.11ax (WiFi 6)	2020	9,6 Gbps	70m	2,4; 5; 6 GHz
802.11af	2014	35 – 560 Mbps	1 Km	bandas de TV não utilizadas (54-790 MHz)
802.11ah	2017	347 Mbps	1 Km	900 MHz

- todos usam CSMA/CA para acesso múltiplo e têm versões de estação base e rede ad-hoc

Arquitetura de LAN 802.11

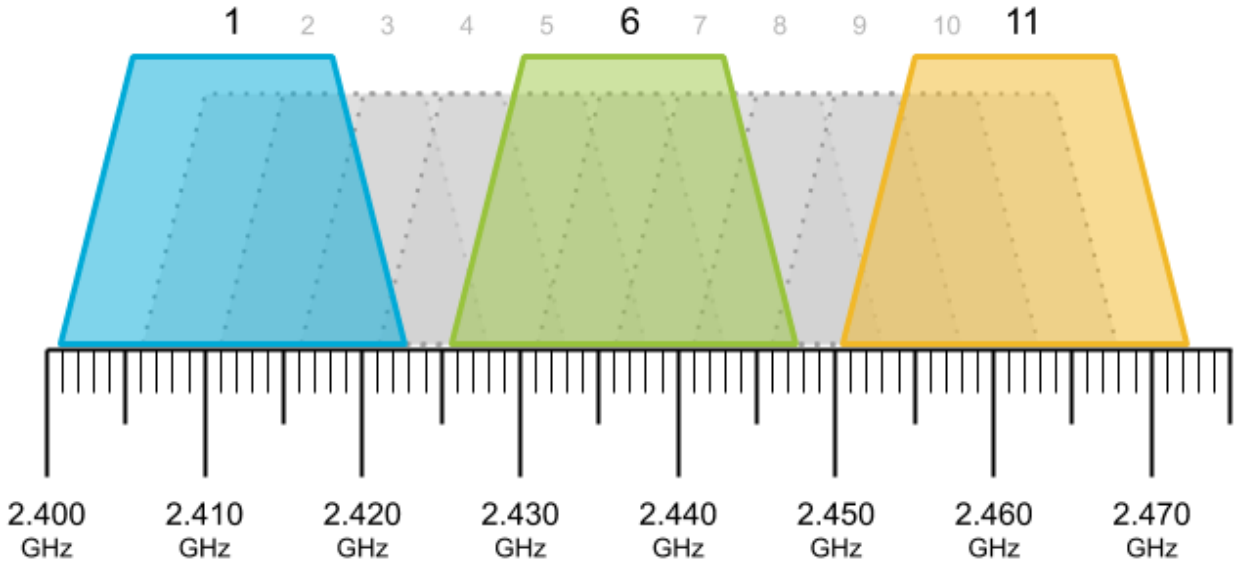


- hospedeiro sem fio se comunica com a estação base
  - estação base = access point (AP – ponto de acesso)
- Basic Service Set (BSS - Conjunto de Serviços Básicos) (também conhecido como “célula”) no modo de infraestrutura contém:
  - hospedeiros sem fio
  - ponto de acesso (AP): estação base
  - modo ad hoc: somente hospedeiros

802.11: Canais

- espectro dividido em canais em diferentes frequências
  - administrador do AP escolhe frequências para o AP
  - possível interferência: o canal pode ser o mesmo escolhido por um AP vizinho!

Exemplo: 2,4 GHz



Vistumbler v10.8.2 - By Andrew Calcutt - 03/05/2023 - (2023-10-25 16-27-19.mdb)

File Edit Options View Settings Interface Extra WifiDB Help *Support Vistumbler*

Stop | Use GPS | Save & Clear

Latitude: N 0000.0000
Longitude: E 0000.0000

Active APs: 23 / 23
Loop time: 1000 ms

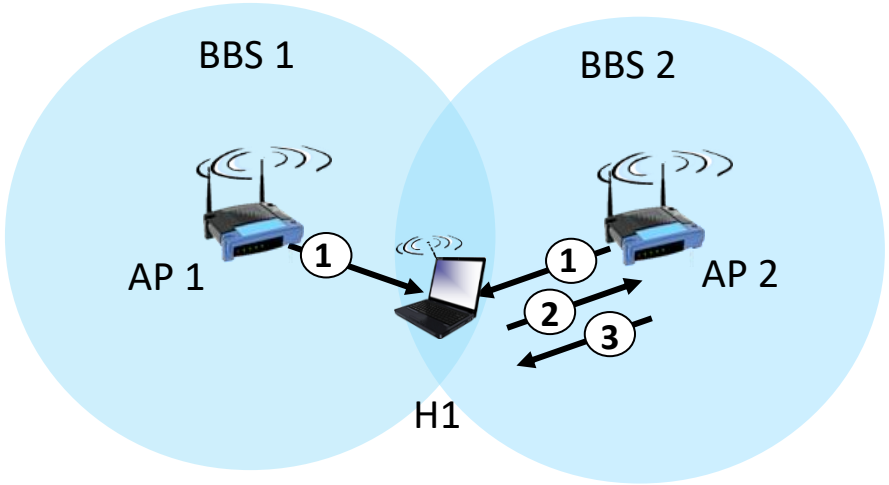
- Authentication
- Channel
- Encryption
- Network Type
- SSID

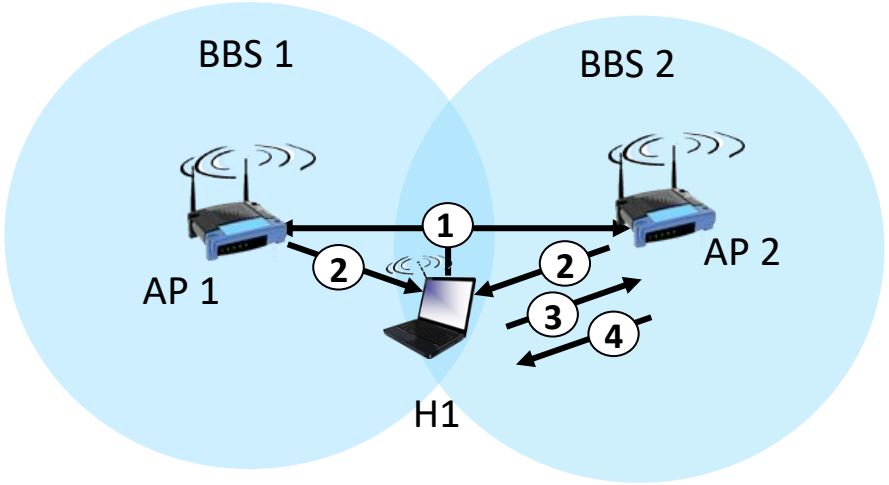
#	Active	Mac Address	SSID	Signal	High Signal	RSSI	High RSSI	Channel	Authentication	Encryption	Network Type	Latitude	Longitude	Manufacturer	Label	Radio Type	Latitude (DDMMSS)	Longitude (DDMMS...	Latitude (DDMMMM)	Longitude (DDMMMM)	Basic Transfer Rates	Other Transfer Rates	First Active	Last Active
1	Active	D8:50:E6:D0:F6:41	CHAPOLIN	81%	87%	-62 dBm	-52 dBm	8	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11,18,24,36,54	6,9,12,48	25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:30.759
2	Active	18:31:BF:35:4D:49	CHAPOLIN	99%	99%	-31 dBm	-24 dBm	8	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11,18,24,36,54	6,9,12,48	25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:30.759
3	Active	A0:36:BC:AF:F5:C0	CHAPOLIN	97%	99%	-34 dBm	-24 dBm	8	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11ax	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11,18,24,36,54	6,9,12,48	25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:30.759
4	Active	D8:50:E6:D0:F6:44	CHAPOLIN	35%	46%	-81 dBm	-77 dBm	36	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11ac	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:30.759
5	Active	A0:36:BC:AF:F5:C4	CHAPOLIN	93%	99%	-40 dBm	-31 dBm	36	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11ax	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:30.759
6	Active	18:31:BF:35:4D:4C	CHAPOLIN	92%	95%	-43 dBm	-38 dBm	36	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11ac	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:30.759
7	Active	18:31:BF:35:4D:4A	CHAPOLIN_Guest	95%	99%	-38 dBm	-26 dBm	8	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11,18,24,36,54	6,9,12,48	25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
8	Active	D8:50:E6:D0:F6:45	CHAPOLIN_Guest	35%	46%	-81 dBm	-77 dBm	36	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11ac	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
9	Active	A0:36:BC:AF:F5:C5	CHAPOLIN_Guest	96%	99%	-35 dBm	-31 dBm	36	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11ax	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
10	Active	18:31:BF:35:4D:4D	CHAPOLIN_Guest	93%	95%	-40 dBm	-38 dBm	36	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11ac	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
11	Active	FA:8F:CA:7C:A3:4B		88%	90%	-50 dBm	-47 dBm	6	Open	None	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	Unknown	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11	6,9,12,18,24,36,48,54	25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
12	Active	10:72:23:C1:7A:14	VIVOFIBRA-DFD4	65%	67%	-71 dBm	-70 dBm	1	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	TELLESCOM IND...	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
13	Active	78:3E:A1:BF:E8:FD	Sofia-5Ghz	35%	43%	-81 dBm	-78 dBm	161	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	Nokia Shanghai B...	Unknown	802.11ac	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
14	Active	78:3E:A1:BF:E8:F9	Sofia-2.4ghz	72%	89%	-68 dBm	-48 dBm	1	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	Nokia Shanghai B...	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11	9,18,36,54,6,12,24,48	25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
15	Active	C6:C6:78:73:8C:57	VIVOFIBRA-8C50	33%	57%	-82 dBm	-74 dBm	161	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	Unknown	Unknown	802.11ac	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
16	Active	D8:C6:78:73:8C:57	VIVOFIBRA-8C50-5G	33%	57%	-82 dBm	-74 dBm	161	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	MitraStar Technol...	Unknown	802.11ac	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:24.281	25-10-2023 16:43:29.757
17	Active	A0:36:BC:AF:F5:C1	CHAPOLIN_Guest	88%	99%	-49 dBm	-24 dBm	8	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11ax	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11,18,24,36,54	6,9,12,48	25-10-2023 16:27:26.890	25-10-2023 16:43:29.757
18	Active	7A:3E:A1:CF:E8:F9		82%	85%	-61 dBm	-55 dBm	1	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	Unknown	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11	9,18,36,54,6,12,24,48	25-10-2023 16:27:27.906	25-10-2023 16:43:29.757
19	Active	FA:8F:CA:74:0A:58		70%	80%	-69 dBm	-65 dBm	8	Open	None	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	Unknown	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11	6,9,12,18,24,36,48,54	25-10-2023 16:27:31.436	25-10-2023 16:43:29.757
20	Active	D8:C6:78:73:8C:50	VIVOFIBRA-8C50	57%	82%	-74 dBm	-61 dBm	1	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	MitraStar Technol...	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:31.436	25-10-2023 16:43:29.757
21	Active	D8:50:E6:D0:F6:42	CHAPOLIN_Guest	81%	86%	-63 dBm	-53 dBm	8	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	ASUSTek COMP...	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11,18,24,36,54	6,9,12,48	25-10-2023 16:27:41.515	25-10-2023 16:43:29.757
22	Active	7A:3E:A1:CF:E8:FD		40%	43%	-79 dBm	-78 dBm	161	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	Unknown	Unknown	802.11ac	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	6,9,12,18,24,36,48,54		25-10-2023 16:27:44.541	25-10-2023 16:43:29.757
23	Active	9C:D8:63:EC:A5:AE	AP_1751591003	67%	81%	-70 dBm	-62 dBm	8	WPA2-Personal	CCMP	Infrastructure	N 0.0000000	E 0.0000000	Unknown	Unknown	802.11n	N 00° 00' 0.0000"	E 00° 00' 0.0000"	N 0000.0000	E 0000.0000	1,2,5.5,11	6,9,12,18,24,36,48,54	25-10-2023 16:29:03.230	25-10-2023 16:43:29.757

802.11: Associação

- hospedeiro chegando: precisa se associar com um AP
  - Varre canais, escutando quadros de *beacon* contendo nome do AP (SSID) e o endereço MAC
  - seleciona AP para se associar
  - então pode realizar autententicação [Capítulo 8]
  - então normalmente executa o DHCP para obter o endereço IP na sub-rede do AP

802.11: varredura passiva/ativa





varredura passiva:

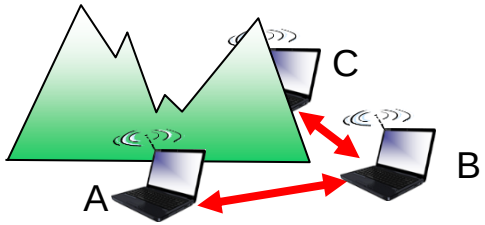
(1) quadros de *beacon* enviados por APs
(2) quadro de Requisição de associação enviado: H1 para AP selecionado
(3) quadro de Resposta de associação do AP selecionado para o H1

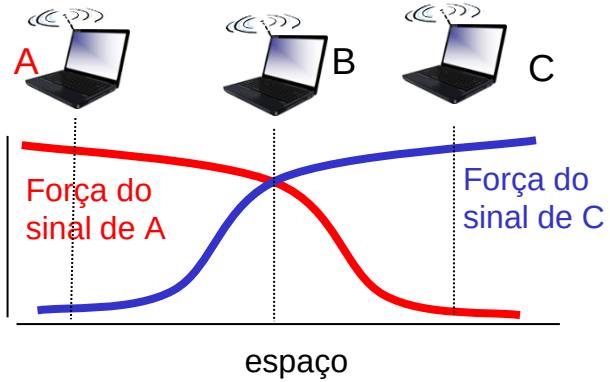
varredura ativa:

(1) quadro de Requisição de Sonda difundido por H1
(2) quadros de Resposta de Sonda enviados por APs
(3) quadro de Requisição de associação enviado: H1 para AP selecionado
(4) quadro de Resposta de associação do AP selecionado para o H1

IEEE 802.11: acesso múltiplo

- evitar colisões: 2^+ nós transmitindo ao mesmo tempo
- 802.11: CSMA – ouça antes de transmitir
  - não colide com uma transmissão em andamento de outro nó detectada
- 802.11: *sem* detecção de colisão!
  - difícil detectar colisões: sinal de transmissão forte, sinal recebido fraco devido à atenuação
  - não pode perceber todas as colisões em qualquer caso: terminal oculto, atenuação
  - objetivo: *evitar colisões:* CSMA/CollisionAvoidance





Protocolo MAC IEEE 802.11: CSMA/CA

emissor 802.11

1 se percebe canal ocioso por **DIFS** então

transmita o quadro inteiro (sem detecção de colisão)

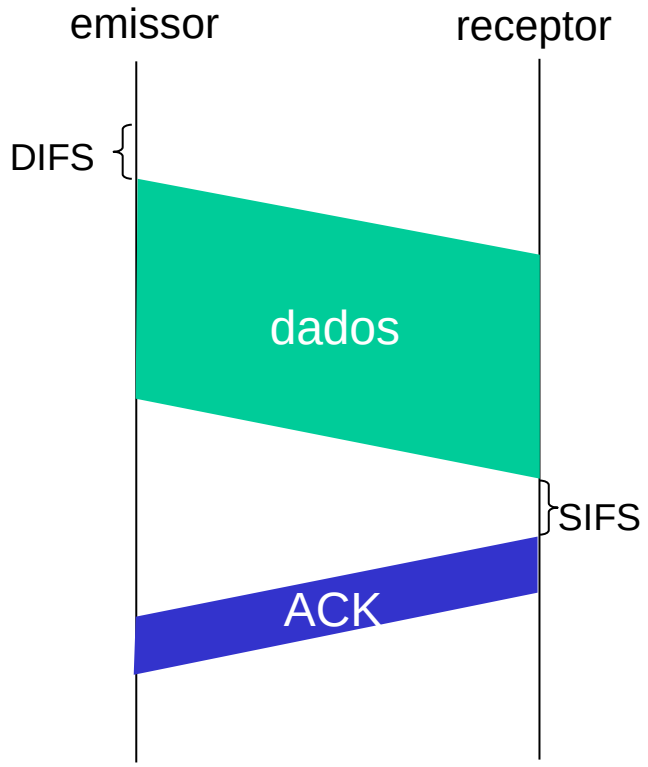
2 se percebe canal ocupado então

inicie o tempo de espera aleatório

temporizador faz a contagem regressiva enquanto o canal está ocioso

transmita quando o temporizador expirar

se não houver ACK, aumente o intervalo de backoff aleatório, repita 2



receptor 802.11

se o quadro foi recebido OK

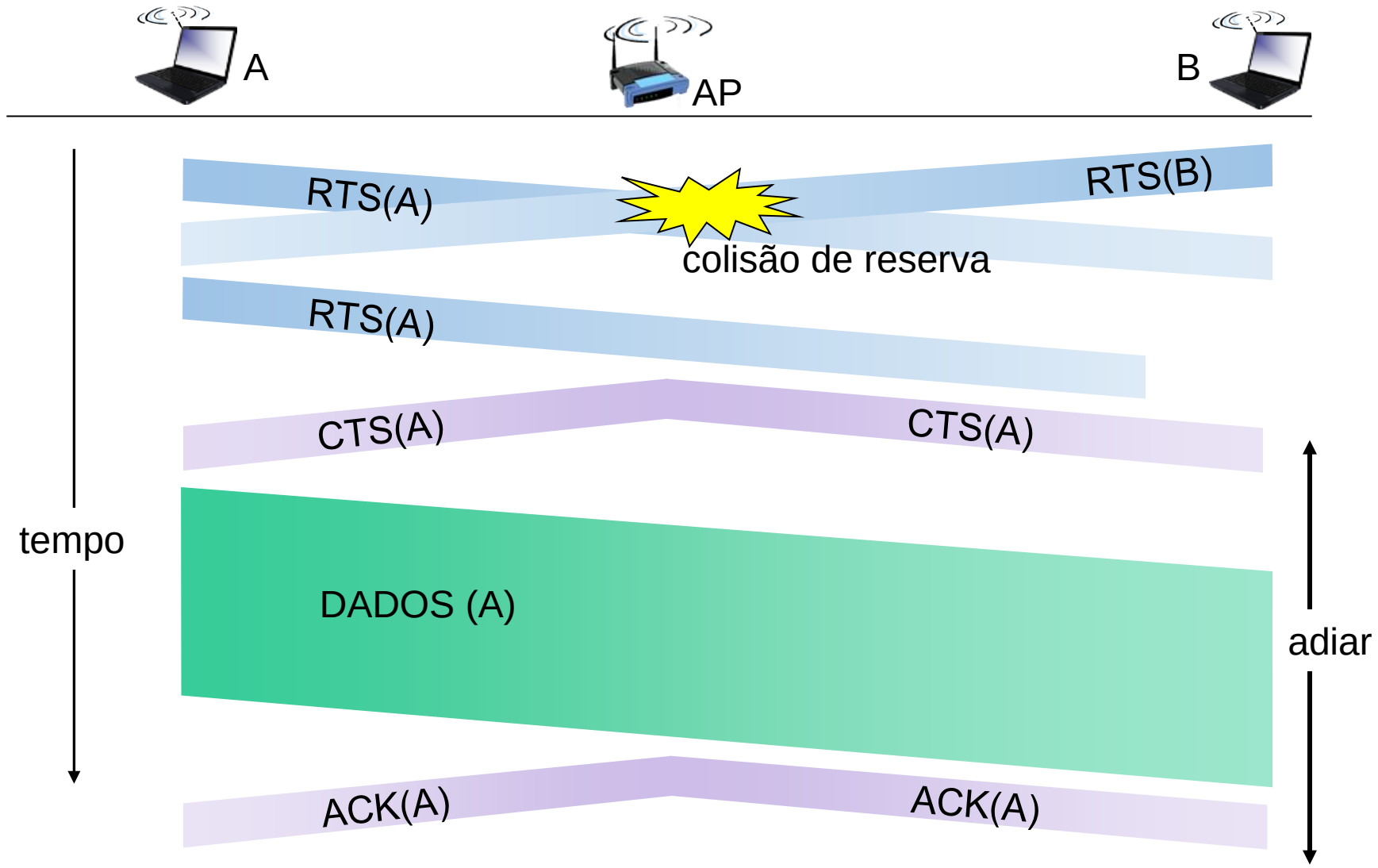
retorne ACK depois de **SIFS** (o ACK é necessário devido ao problema de terminal oculto)

Evitando colisões (mais)

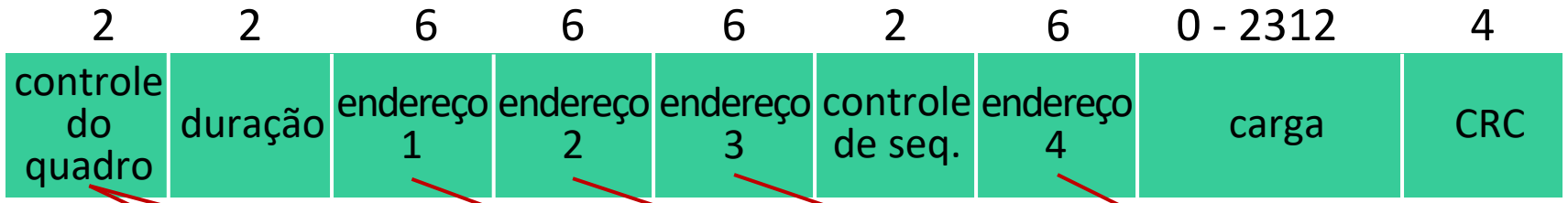
ideia: o emissor "reserva" o uso do canal para quadros de dados usando pequenos pacotes de reserva

- emissor primeiro transmite um *pequeno* pacote request-to-send (RTS – requisição para enviar) para a estação base usando CSMA
  - RTSs ainda podem colidir uns com os outros (mas são curtos)
- BS difunde (*broadcasts*) clear-to-send (CTS – livre para enviar) em resposta ao RTS
- CTS é ouvido por todos os nós
  - emissor transmite quadro de dados
  - outras estações adiam transmissões

Prevenção de Colisão: troca de RTS-CTS



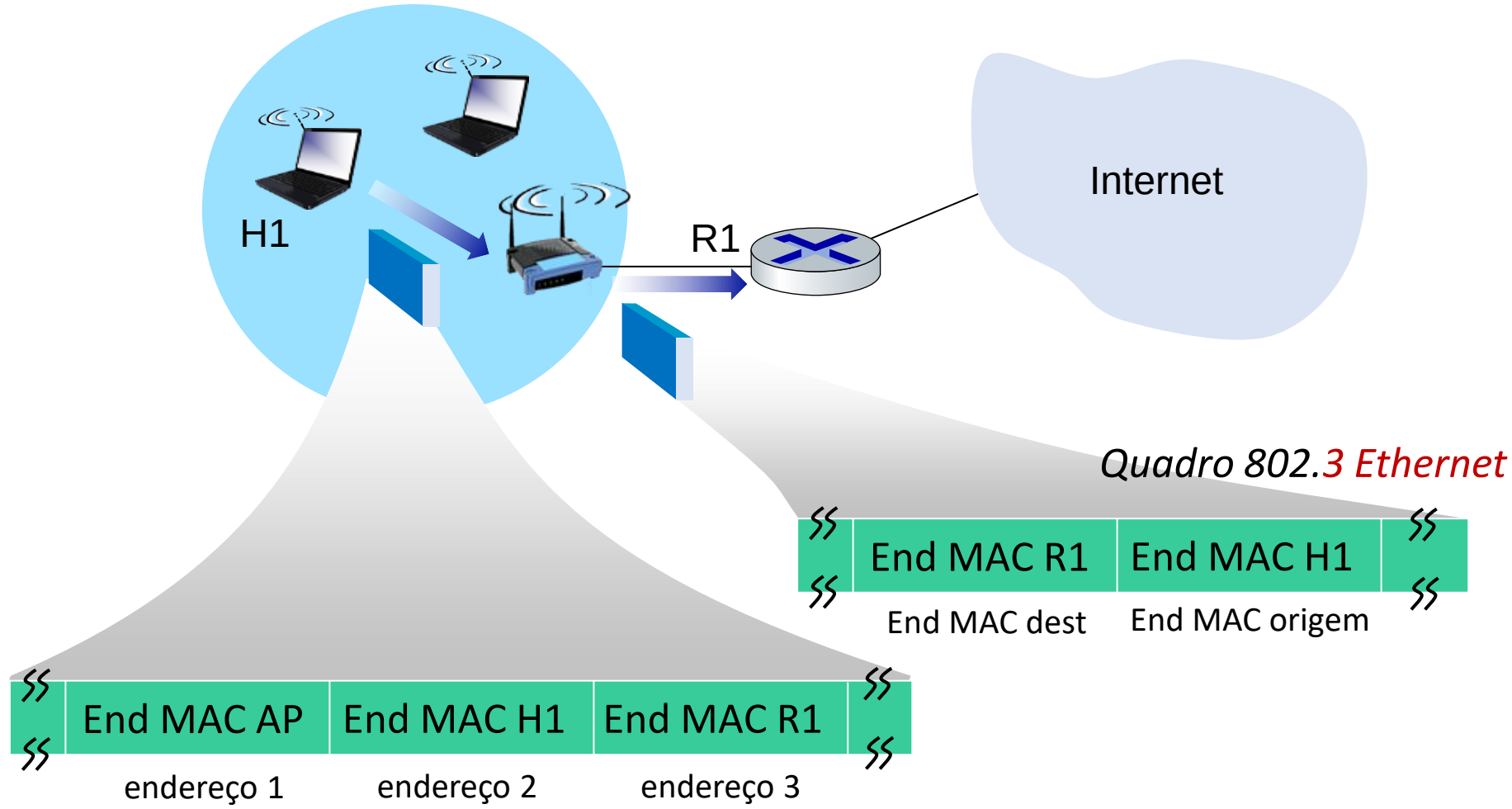
Quadro 802.11: endereçando



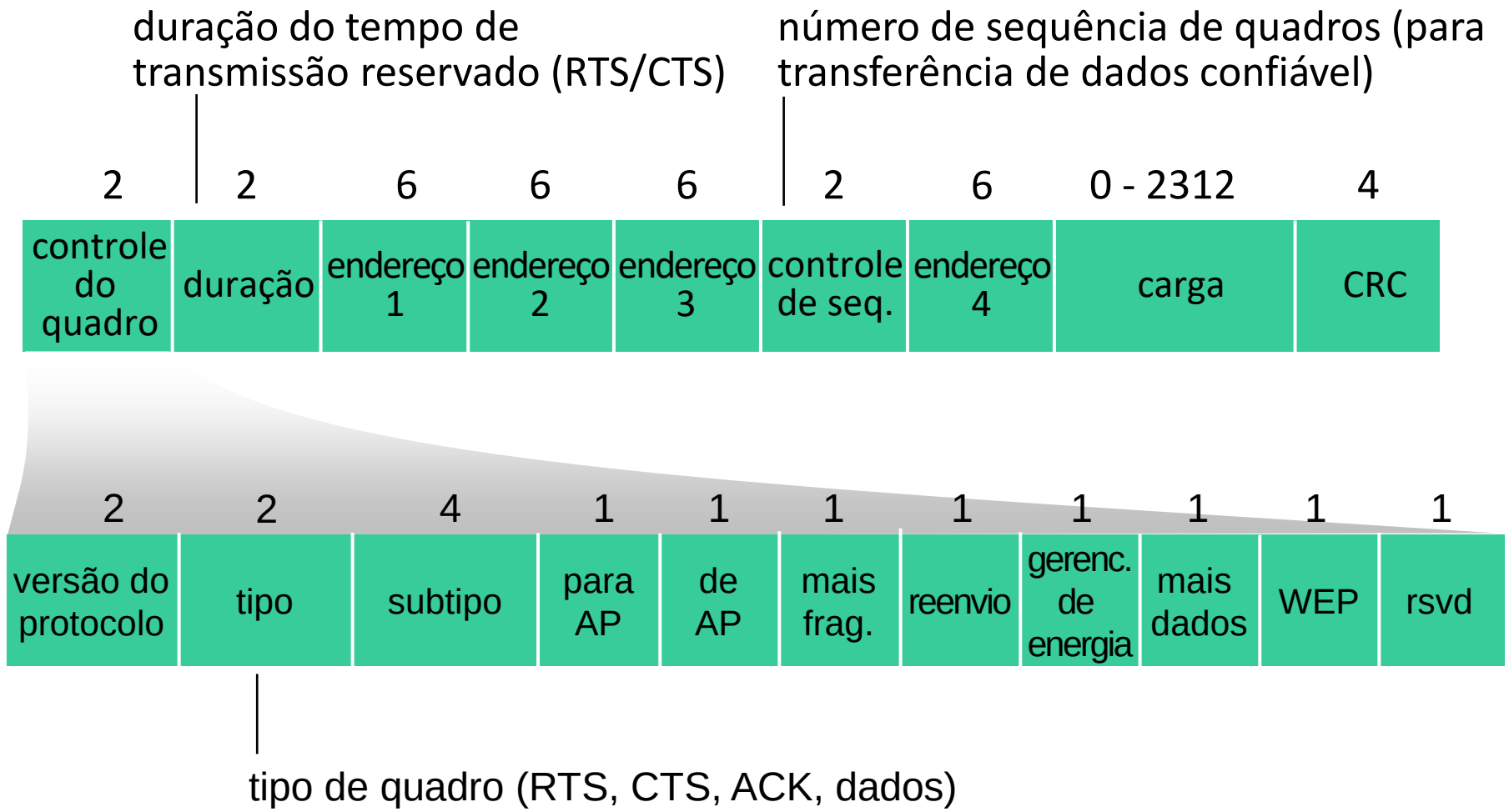
Função	ToDS (para AP)	FromDS (de AP)	Endereço 1 (receptor)	Endereço 2 (transmissor)	Endereço 3	Endereço 4
Redes Ad-hoc	0	0	End. Destinatário	End. Origem	BSSID	Não Usado
Quadro enviado para AP (infra.)	1	0	BSSID	End. Origem	End. Destinatário	Não Usado
Quadro enviado pelo AP (infra.)	0	1	End. Destinatário	BSSID	End. Origem	Não Usado
WDS (ponte)	1	1	End. Receptor (próxima estação que recebe o quadro)	End. Transmissor (MAC da estação que transmitiu o quadro)	End. Destinatário	End. Origem

BSSID (Identificador de BSS) identifica unicamente cada BSS. Quando o quadro é vindo de uma estação que opera em modo infra-estrutura BSS, BSSID é o endereço MAC do AP. Quando o quadro é vindo de uma estação que opera em modo *ad hoc* (IBSS), o BSSID é um número aleatório gerado e localmente administrado pela estação que iniciou a transmissão.

Quadro 802.11: endereçando

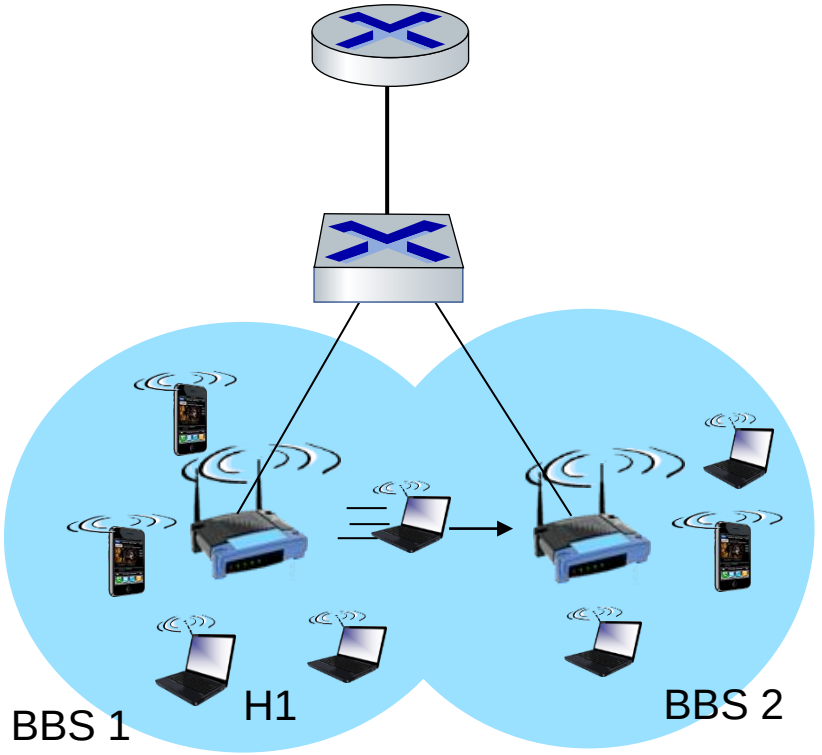


Quadro 802.11: endereçando



802.11: mobilidade dentro da mesma sub-rede

- H1 permanece na mesma sub-rede IP: o endereço IP pode permanecer o mesmo
- comutador: qual AP está associado a H1?
  - autoaprendizagem (cap. 6): o comutador verá o quadro de H1 e “lembrará” qual porta pode ser usada para alcançar H1



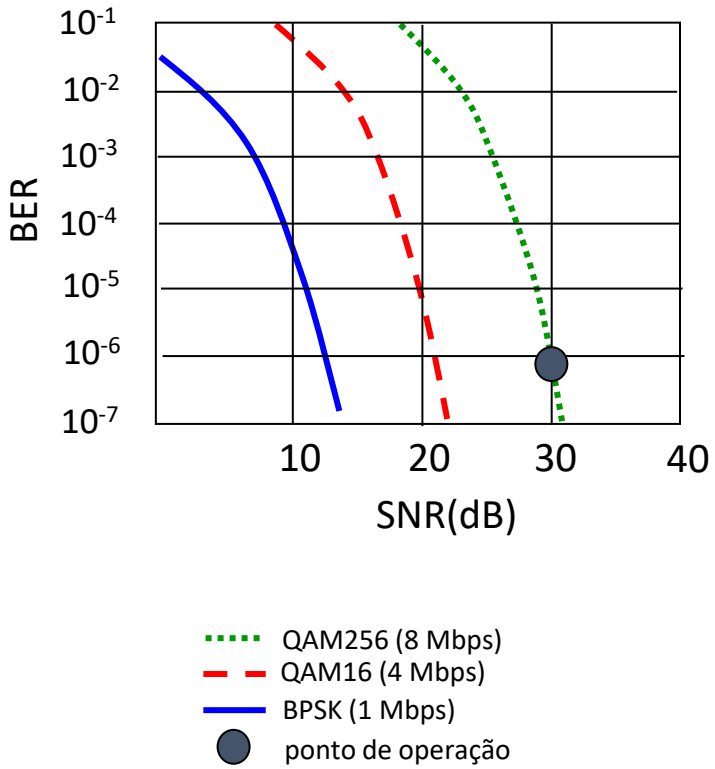
802.11: recursos avançados

Adaptação de taxa

- estação base e dispositivo móvel mudam dinamicamente a taxa de transmissão (técnica de modulação de camada física) à medida que o dispositivo se move e o SNR varia

1. SNR diminui, BER aumenta à medida que o nó se afasta da estação base

2. Quando o BER fica muito alto, muda-se para uma taxa de transmissão mais baixa, mas com um BER mais baixo



802.11: recursos avançados

gerenciamento de energia

- nó-para-AP: “Eu vou dormir até o próximo quadro de *beacon*”
  - AP sabe que não deve transmitir quadros para este nó
  - nó acorda antes do próximo quadro de *beacon*
- quadro de *beacon*: contém uma lista de dispositivos com quadros AP-para-nó esperando para serem enviados
  - o nó permanecerá acordado se há quadros AP-para-nó para serem enviados a ele; caso contrário, dorme novamente até o próximo quadro de *beacon*

Capítulo 7: roteiro

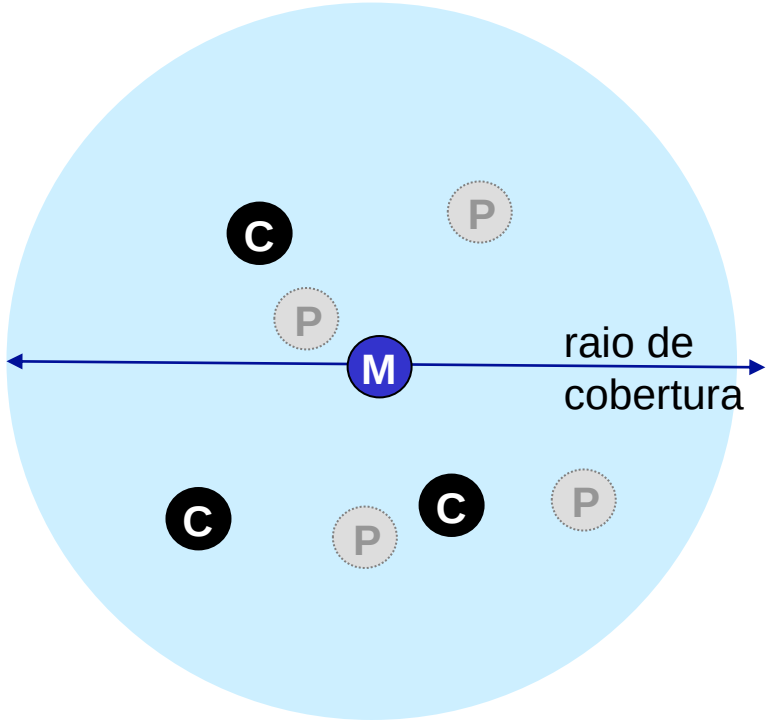
- Introdução

Sem Fio

- Enlaces Sem Fio e características de rede
- CDMA: code division multiple access
- WiFi: LANs sem fio 802.11
- Bluetooth

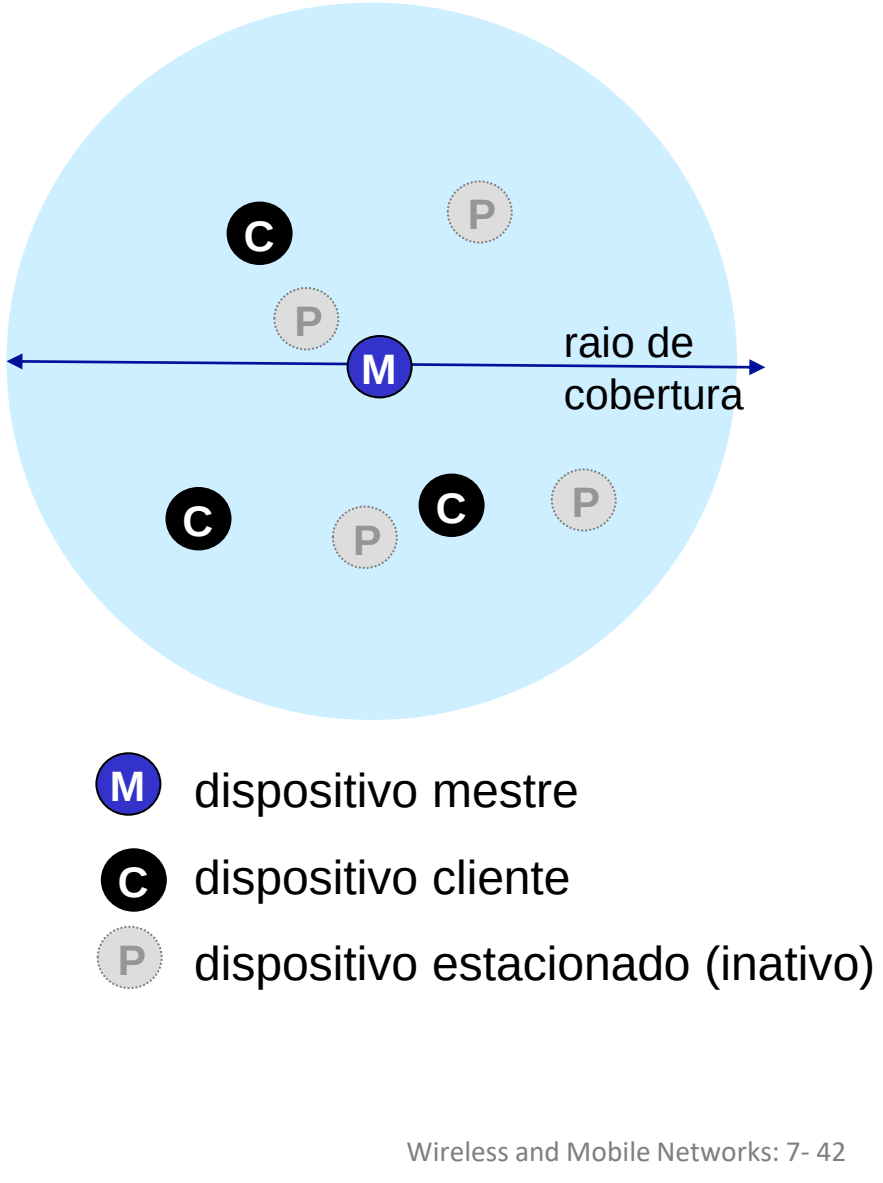
Redes de área pessoal: Bluetooth

- menos de 10 metros de diâmetro
- substituição de cabos (mouse, teclado, fones de ouvido)
- ad hoc: sem infraestrutura
- banda de rádio ISM de 2,4-2,5 GHz, até 3 Mbps
- dispositivos mestre controlador / clientes:
  - mestre consulta clientes, concede solicitações para transmissões de clientes



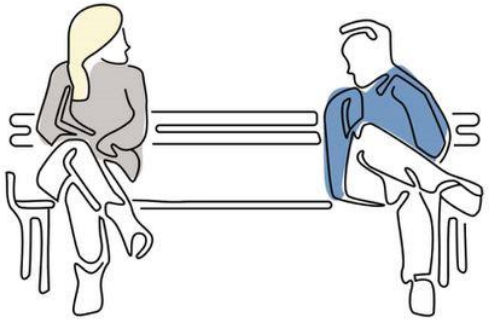
Redes de área pessoal: Bluetooth

- TDM, 625 μsegundos por *slot*
- FDM: o remetente usa 79 canais de frequência em ordem pseudo-aleatória conhecida, slot-para-slot (*spread spectrum* - espectro espalhado)
  - outros dispositivos/equipamentos que não estão na piconet interferem apenas em alguns slots
- modo estacionado: os clientes podem "ir dormir" (estacionar) e depois acordar (para economizar bateria)
- *Bootstrapping* (inicialização): nós se automontam (plug and play) na piconet



Pandemia + Bluetooth

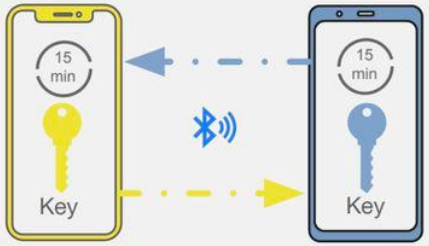
Alice and Bob meet each other for the first time and have a 10-minute conversation.



Bob is positively diagnosed for COVID-19 and enters the test result in an app from a public health authority.

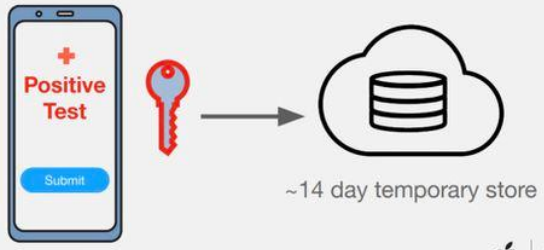
A few days later...

Their phones exchange anonymous identifier beacons (which change frequently).



With Bob's consent, his phone uploads the last 14 days of keys for his broadcast beacons to the cloud.

Apps can only get more information via user consent



Google

Source: https://www.macrumors.com/guide/exposure-notification/

Capítulo 7: roteiro

- Introdução

Sem Fio

- Enlaces Sem Fio e características de rede
- WiFi: LANs sem fio 802.11
- Redes Celulares: 4G e 5G

Mobilidade

- Gestão da mobilidade: princípios
- Gestão da mobilidade: prática
  - Redes 4G/5G
  - IP Móvel
- Mobilidade: impacto em protocolos de camadas superiores

Redes celulares 4G/5G

- *a* solução para Internet móvel de longa distância
- implantação/uso generalizado:
  - mais dispositivos conectados por banda larga móvel do que dispositivos conectados por banda larga fixa (5 para 1 em 2019)!
  - Disponibilidade 4G: 97% do tempo na Coreia (90% nos EUA)
- taxas de transmissão de até 100 Mbps
- normas técnicas: Projeto de Parceria de 3ª Geração (3GPP)
  - https://www.3gpp.org/
  - 4G: padrão Long-Term Evolution (LTE)

Redes celulares 4G/5G

semelhanças com a Internet com fio

- distinção de borda/núcleo, mas ambos abaixo da mesma operadora
- rede celular global: uma rede de redes
- uso generalizado dos protocolos que estudamos: HTTP, DNS, TCP, UDP, IP, NAT, separação de planos de dados/controle, SDN, Ethernet, tunelamento
- interconectadas à Internet com fio

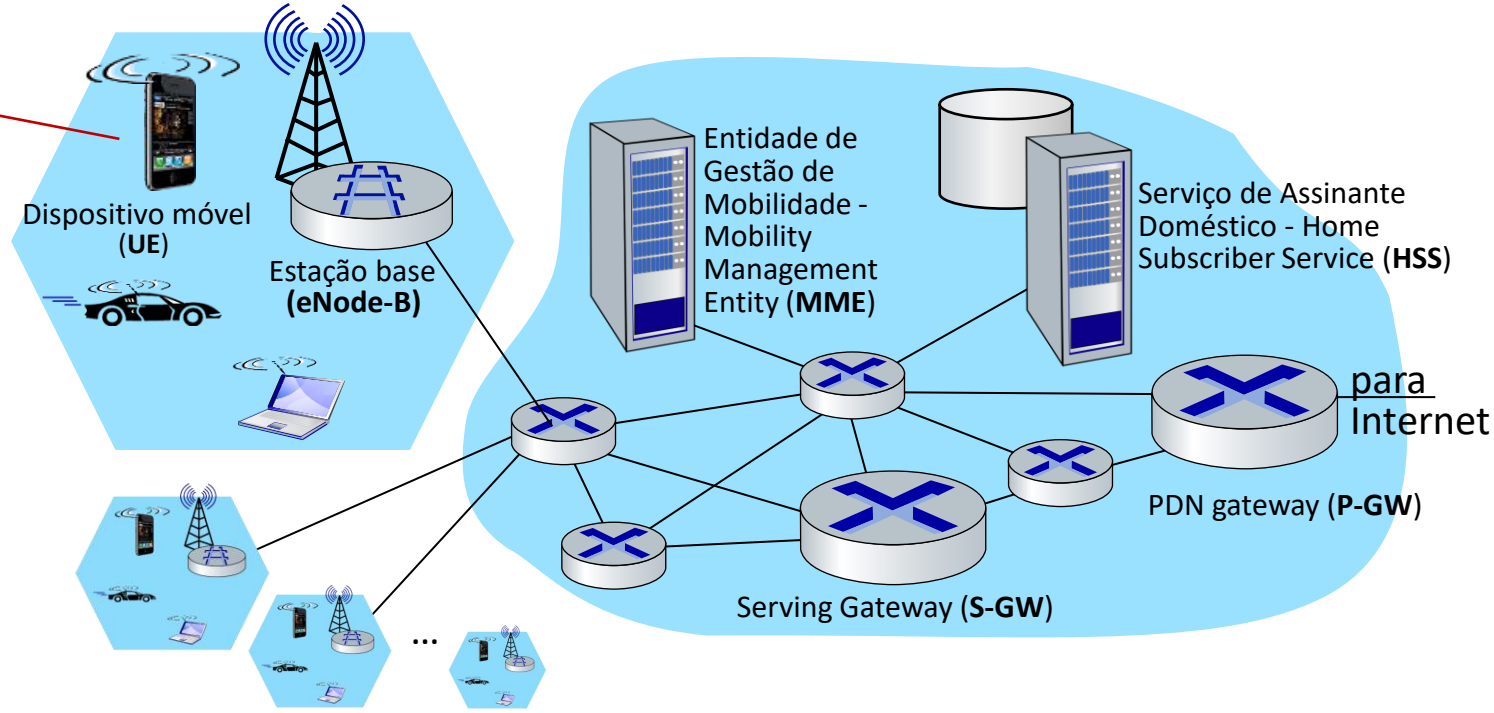
diferenças da internet cabeada

- camada de enlace sem fio diferente
- mobilidade como serviço de 1ª classe
- "identidade" do usuário (via cartão SIM)
- modelo de negócios: os usuários assinam um provedor de celular
  - forte noção de "rede doméstica" versus roaming em redes visitadas
  - acesso global, com infraestrutura de autenticação e acordos entre operadoras

Elementos da arquitetura 4G LTE

Dispositivo móvel:

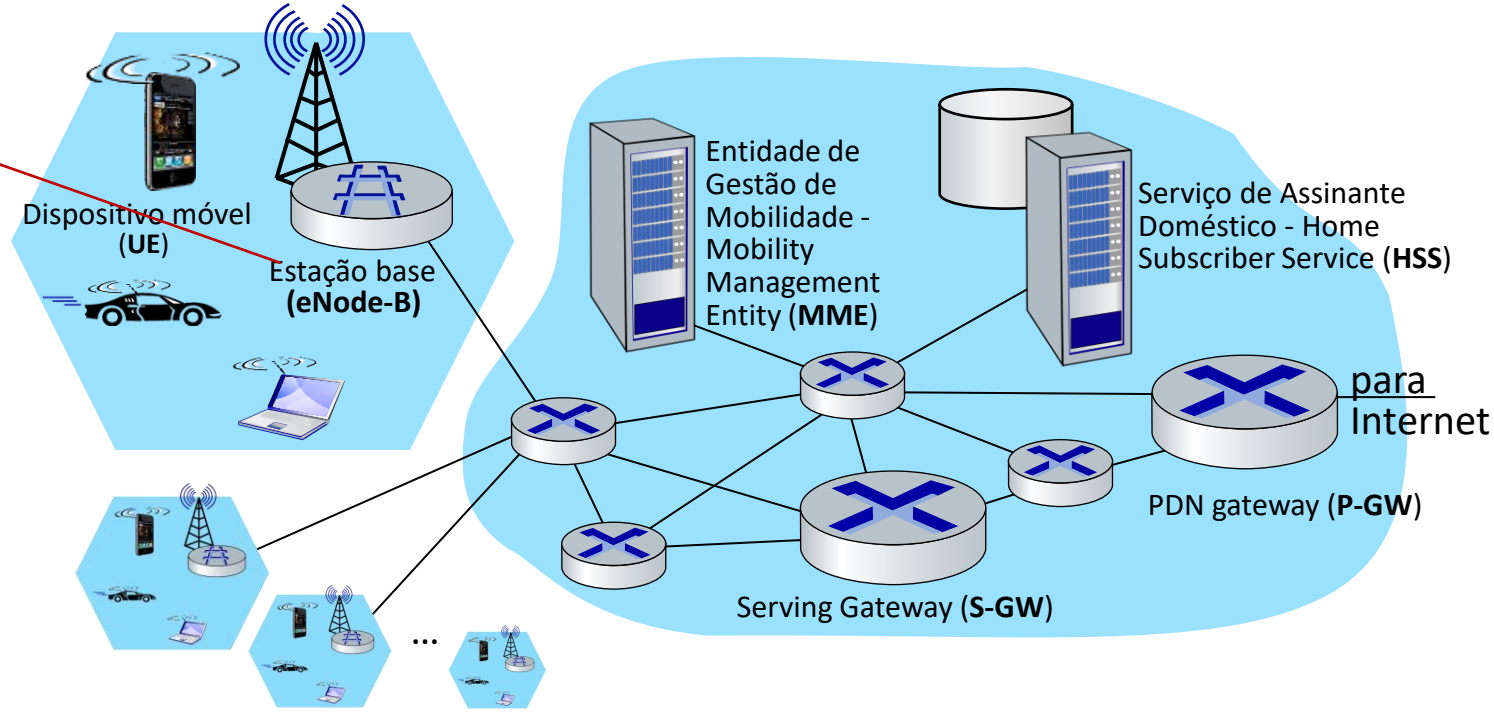
- smartphone, tablet, laptop, IoT, ... com rádio 4G LTE
- Identidade Internacional do Assinante Móvel de 64 bits (IMSI - International Mobile Subscriber Identity), armazenada no cartão SIM (Subscriber Identity Module - Módulo de Identidade do Assinante)
- Jargão LTE: Equipamento do usuário (UE – User Equipment)



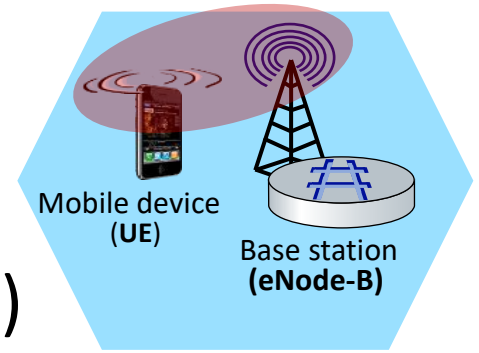
Elementos da arquitetura 4G LTE

Estação base:

- na “borda” da rede da operadora
- gerencia recursos de rádio sem fio e dispositivos móveis em sua área de cobertura (“célula”)
- coordena a autenticação do dispositivo com outros elementos
- semelhante ao WiFi AP, mas:
  - papel ativo na mobilidade do usuário
  - coordenadas com estações base próximas para otimizar o uso do rádio
- jargão LTE: eNode-B



Rede de Acesso via Rádio: Rádio 4G



- conecta dispositivo (UE) a uma estação base (eNode-B)
  - vários dispositivos conectados a cada estação base
- muitas bandas de frequências possíveis diferentes, vários canais em cada banda
  - bandas populares: 600, 700, 850, 1500, 1700, 1900, 2100, 2600, 3500 MHz
  - canais upstream e downstream separados
- compartilhamento de canal de rádio 4G entre usuários :
  - OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
  - combinação de FDM e TDM
- Centenas de Mbps possíveis por usuário/dispositivo

Espectro

UNITED STATES FREQUENCY ALLOCATIONS

THE RADIO SPECTRUM

RADIO SERVICES COLOR LEGEND

- AERONAUTICAL MOBILE
- AERONAUTICAL MOBILE SATELLITE
- AERONAUTICAL RADIONAVIGATION
- AMATEUR
- AMATEUR SATELLITE
- BROADCASTING
- BROADCASTING SATELLITE
- EARTH EXPLORATION SATELLITE
- FIXED
- FIXED SATELLITE
- INTER-SATELLITE
- LAND MOBILE
- LAND MOBILE SATELLITE
- MARITIME MOBILE
- MARITIME MOBILE SATELLITE
- MARITIME RADIONAVIGATION
- METEOROLOGICAL
- METEOROLOGICAL SATELLITE
- MOBILE
- MOBILE SATELLITE
- RADIO ASTRONOMY
- RADIODETERMINATION SATELLITE
- RADIOLOCATION
- RADIOLOCATION SATELLITE
- RADIONAVIGATION
- RADIONAVIGATION SATELLITE
- SPACE OPERATION
- SPACE RESEARCH
- STANDARD FREQUENCY AND TIME SIGNAL
- STANDARD FREQUENCY AND TIME SIGNAL SATELLITE

ACTIVITY CODE

- FEDERAL EXCLUSIVE
- FEDERAL/NON-FEDERAL SHARED
- NON-FEDERAL EXCLUSIVE

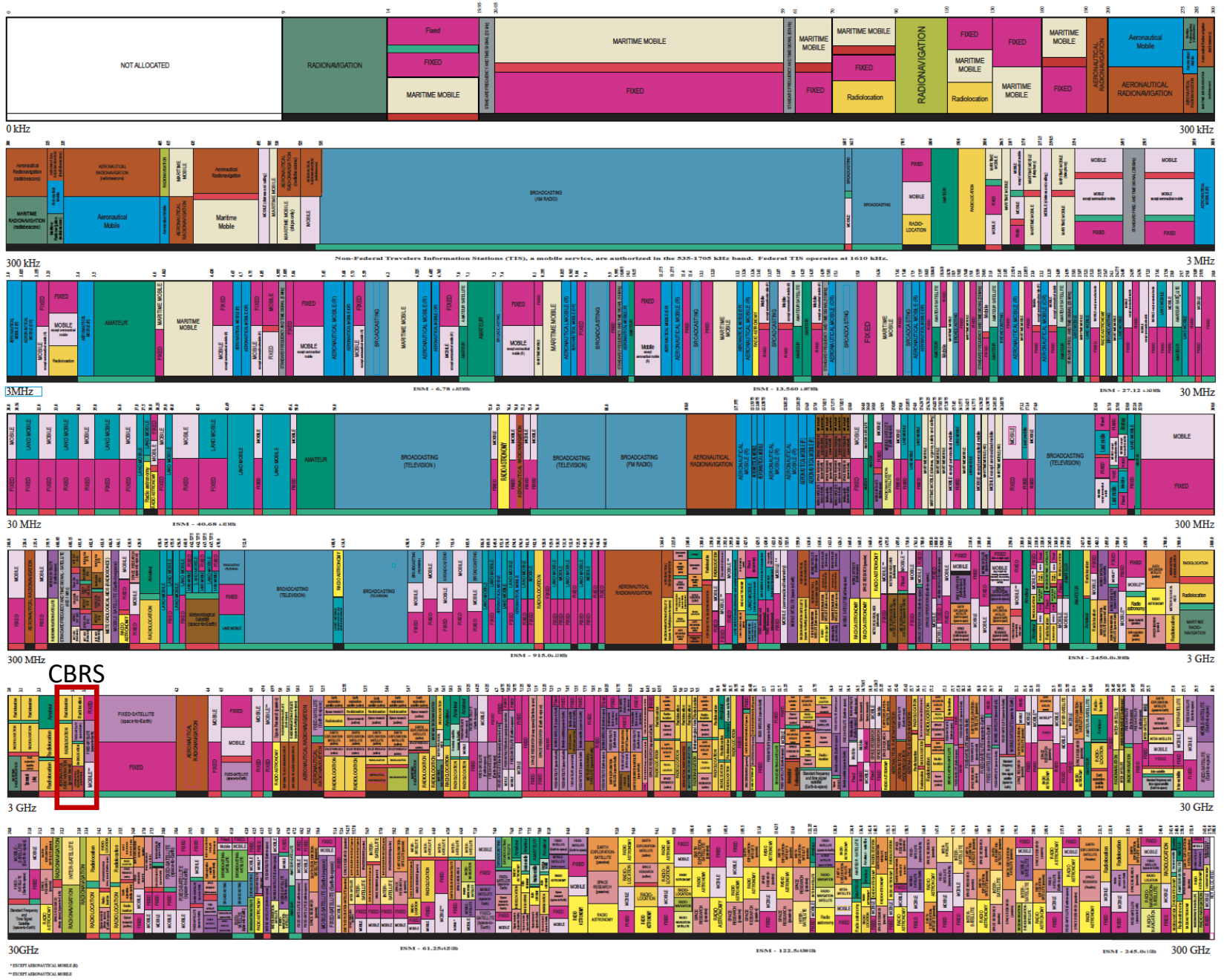
ALLOCATION USAGE DESIGNATION

SERVICE	EXAMPLE	DESCRIPTION
Primary	FIXED	Capital Letters
Secondary	Mobile	1st Capital with lower case letters

This chart is a graphic single-point-in-time portrayal of the Table of Frequency Allocations used by the FCC and NTIA. As such, it may not completely reflect all aspects, i.e. footnotes and recent changes made to the Table of Frequency Allocations. Therefore, for complete information, users should consult the Table to determine the current status of U.S. allocations.

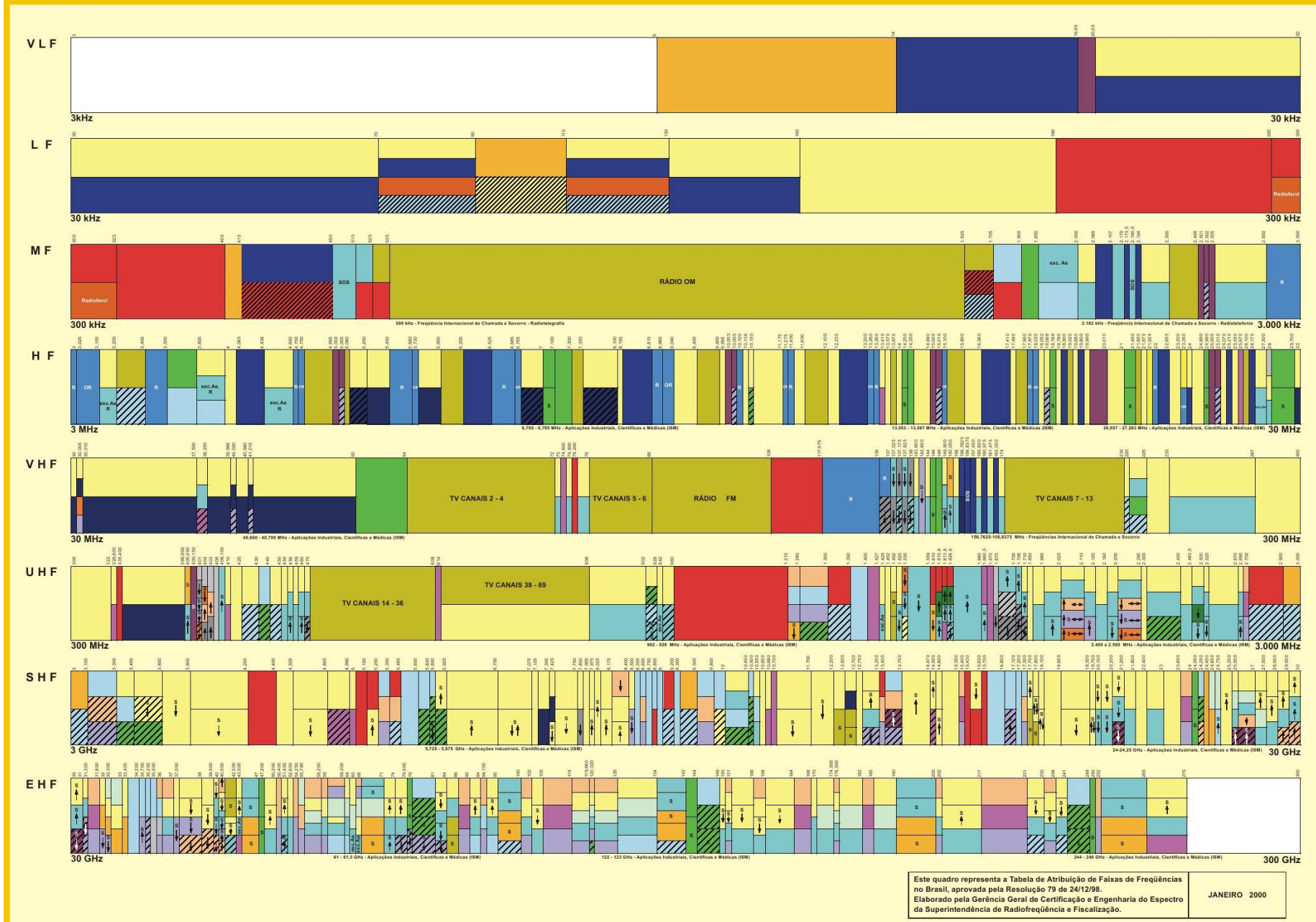
U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE
National Telecommunications and Information Administration
Office of Spectrum Management

JANUARY 2016



PLEASE NOTE: THE SPACING ALLOTTED THE SERVICES IN THE SPECTRUM SEGMENTS SHOWN IS NOT PROPORTIONAL TO THE ACTUAL AMOUNT OF SPECTRUM OCCUPIED.

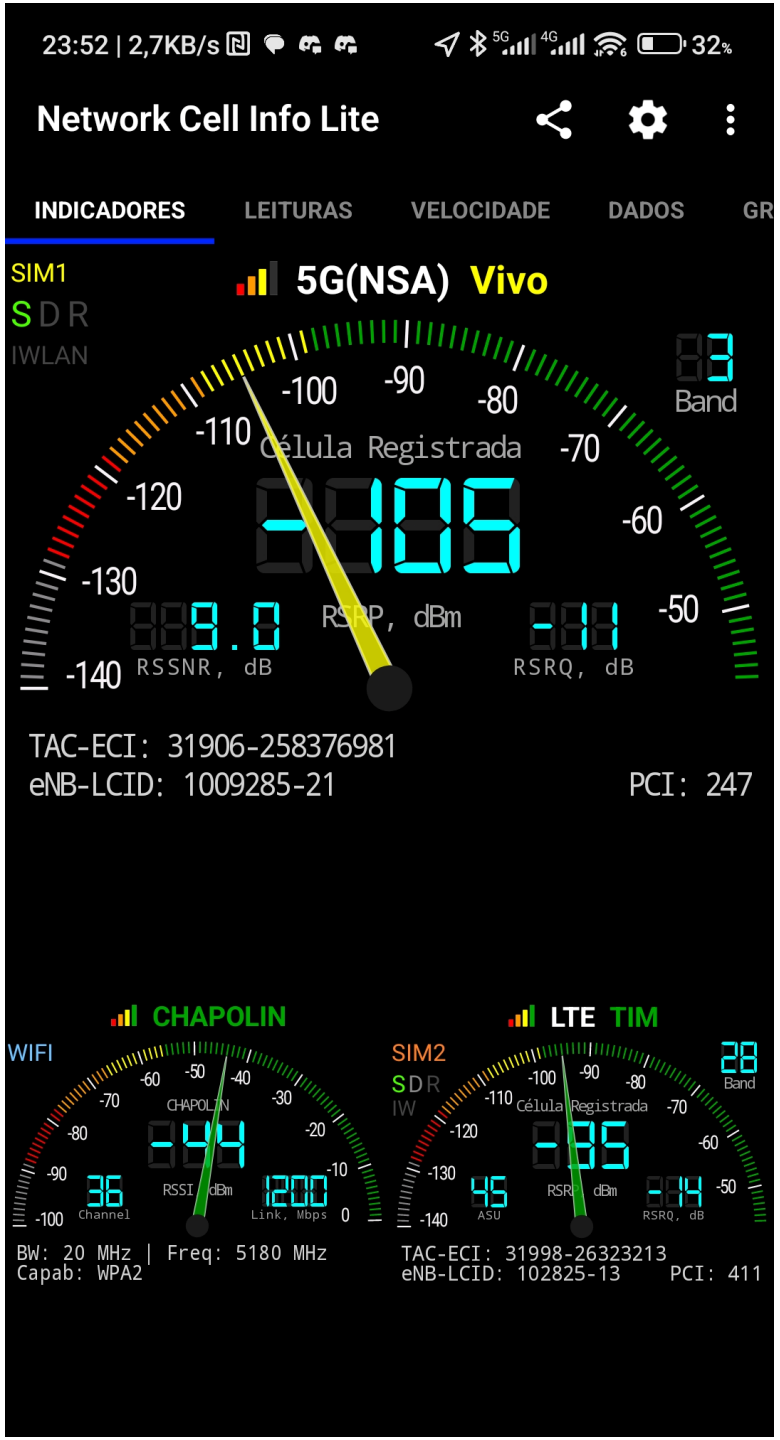
ATRIBUIÇÃO DE FAIXAS DE FREQÜÊNCIAS NO BRASIL



Este quadro representa a Tabela de Atribuição de Faixas de Freqüências no Brasil, aprovada pela Resolução 79 de 24/12/98.
Elaborado pela Gerência Geral de Certificação e Engenharia do Espectro da Superintendência de Radiofreqüência e Fiscalização.

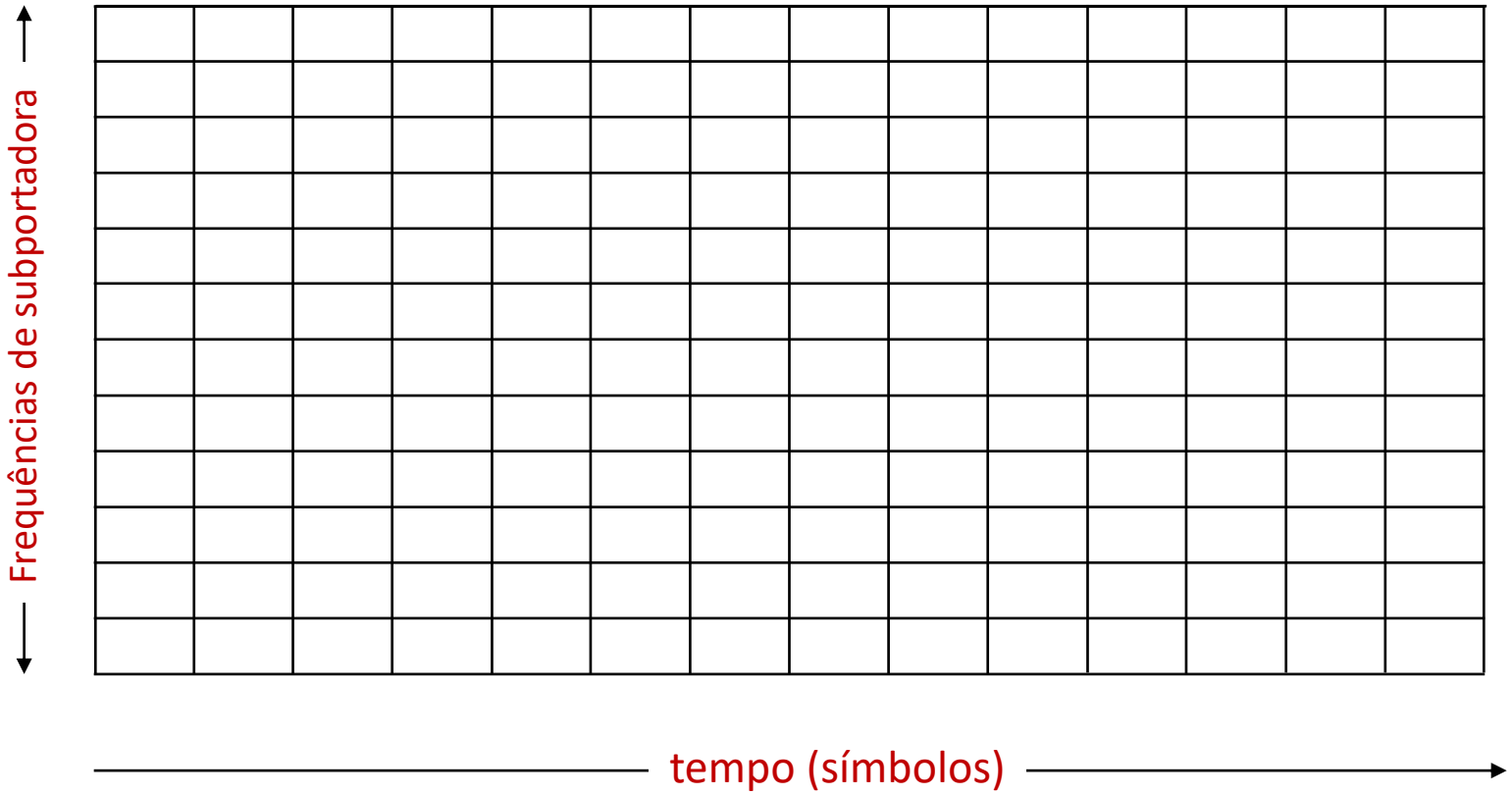
JANEIRO 2000

Fonte: https://wiki.sj.ifsc.edu.br/index.php/Uso_de_Radio_Frequencias-_Alunos



- 5G NSA: o 5G “impuro”, que usa o mesmo núcleo da rede 4G.
  - Não exige a troca do SIM card
- Banda 3: 1800 MHz
  - *Uplink*: 1710 – 1785 MHz
  - *Downlink*: 1805 – 1880 MHz
- Banda 28: 700 MHz
  - *Uplink*: 703 – 748 MHz
  - *Downlink*: 758 – 803 MHz

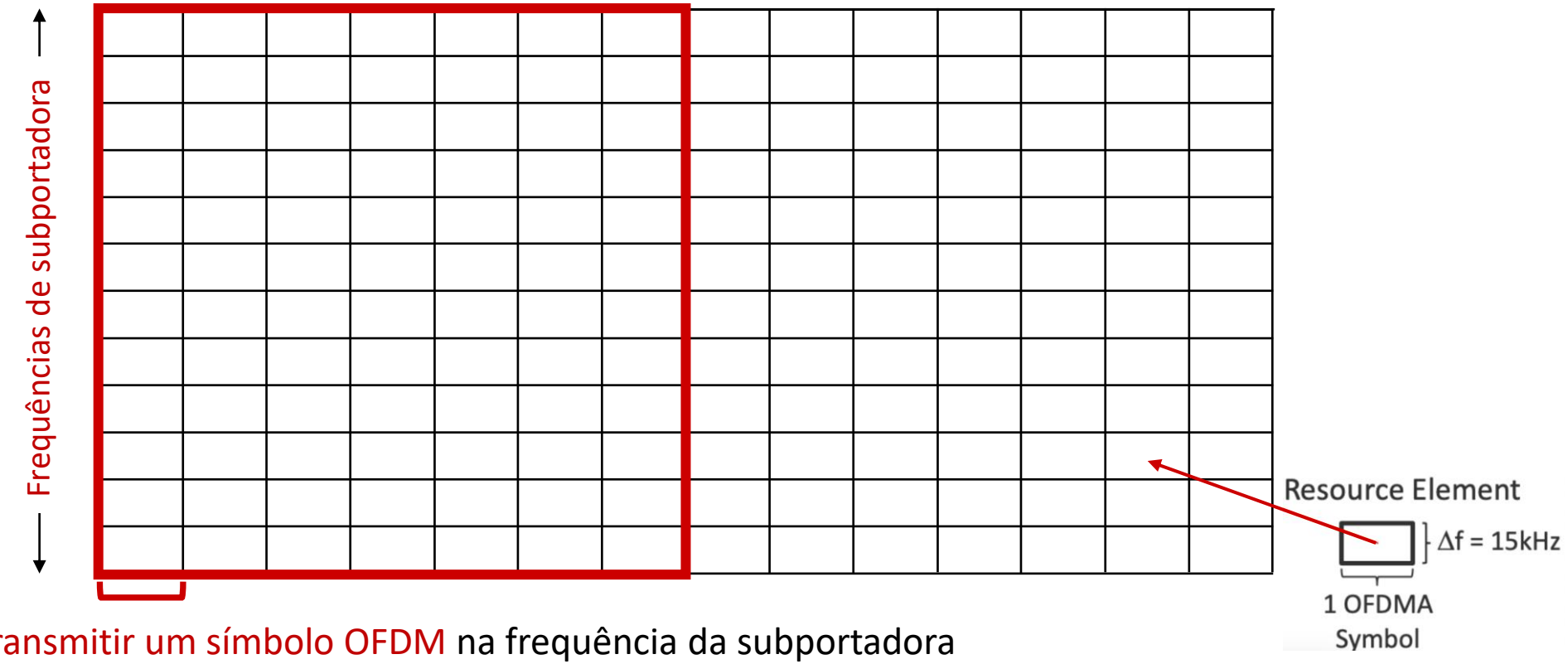
OFDMA: divisão de tempo (LTE)



OFDMA: divisão de tempo (LTE)

Bloco de Recursos Físicos (PRB - Physical Resource Block): blocos de 7x12=84 elementos de recurso

- unit of transmission scheduling



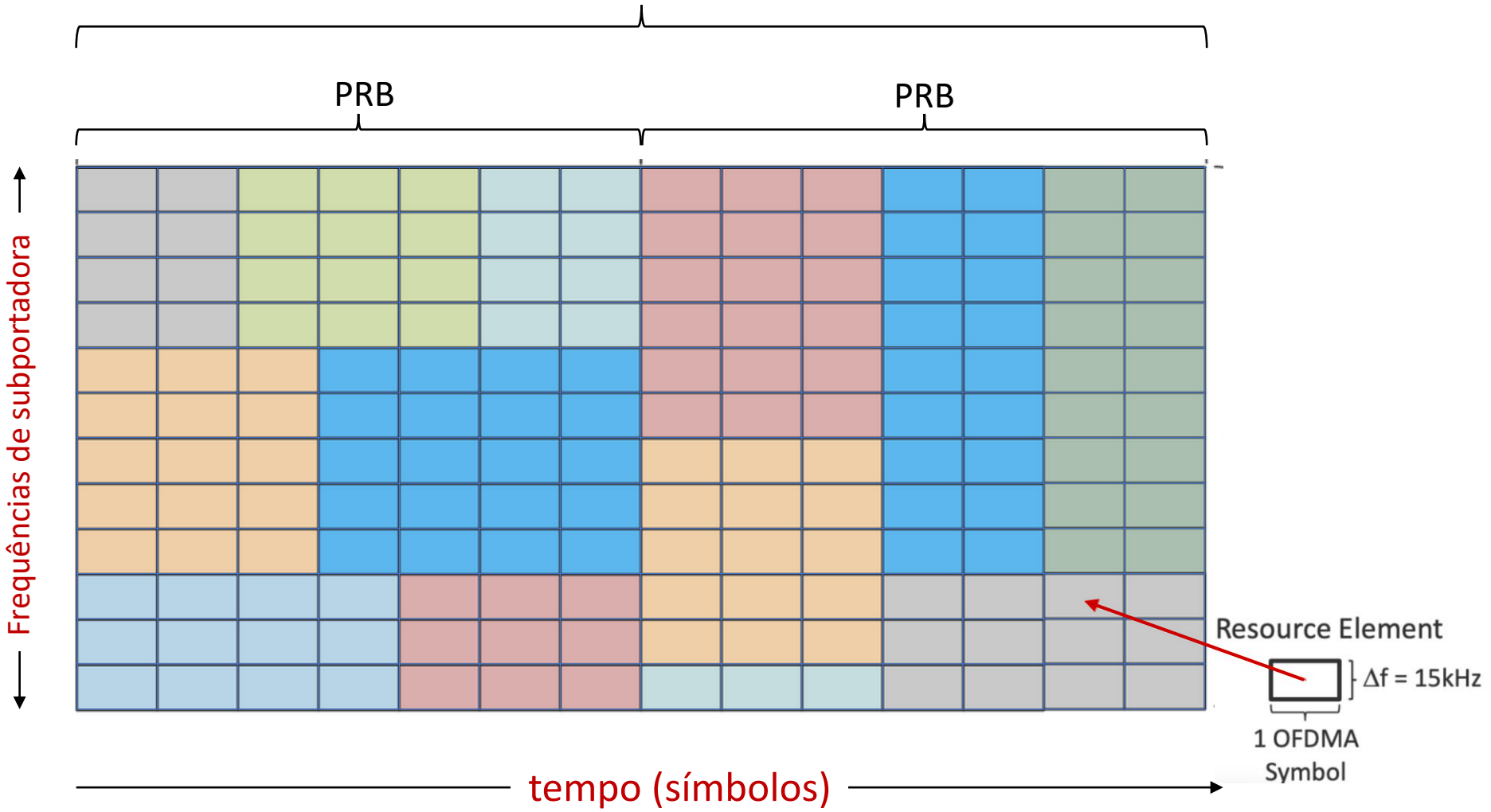
tempo para transmitir um símbolo OFDM na frequência da subportadora

OFDMA:

Exemplo de agendamento de transmissão:

- Envie para 7 UEs em 7 blocos de REs em um PRB

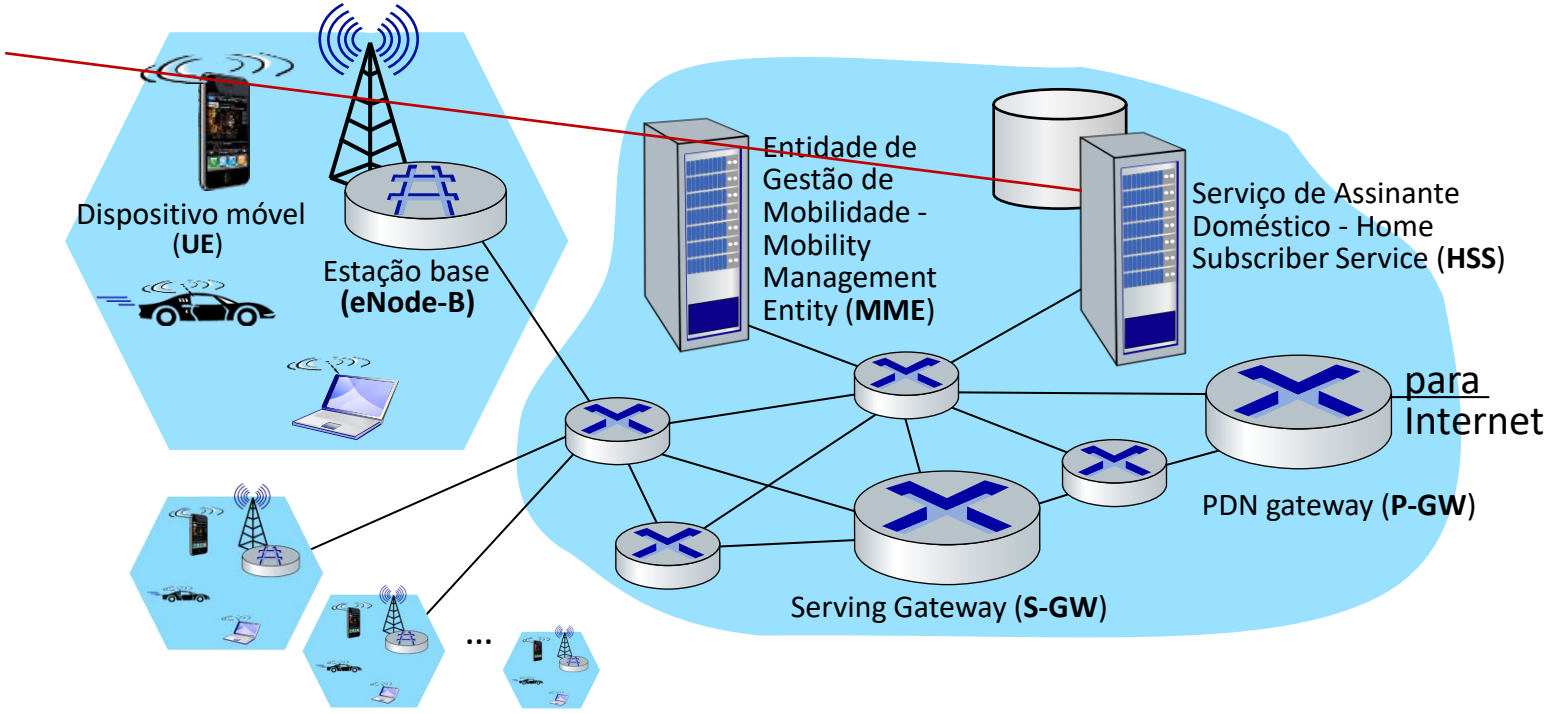
UE_1
UE_2
UE_3
UE_4
UE_5
UE_6
UE_7



Elementos da arquitetura 4G LTE

Serviço de Assinante Doméstico

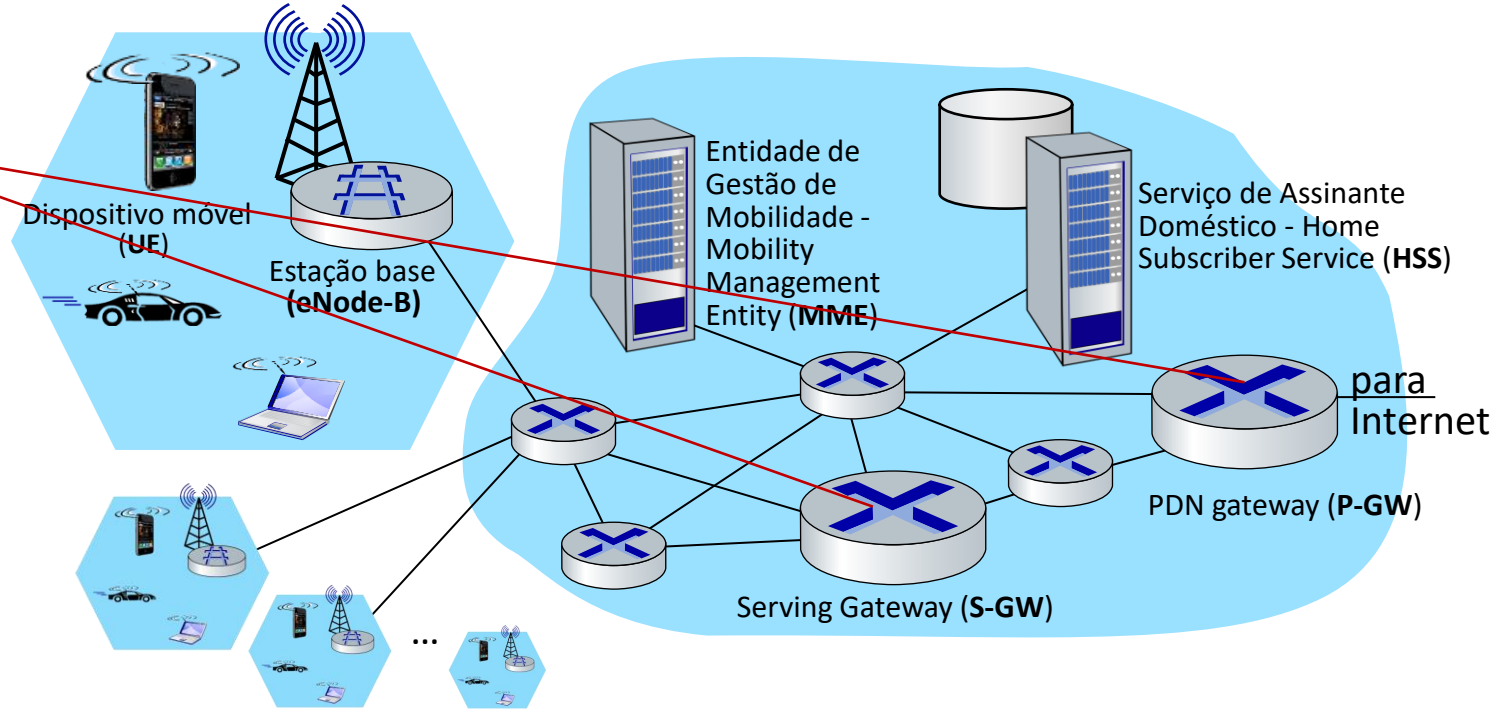
- armazena informações sobre dispositivos móveis para os quais a rede do HSS é sua “rede doméstica”
- trabalha com a MME na autenticação do dispositivo



Elementos da arquitetura 4G LTE

Serving Gateway (S-GW), PDN Gateway (P-GW)

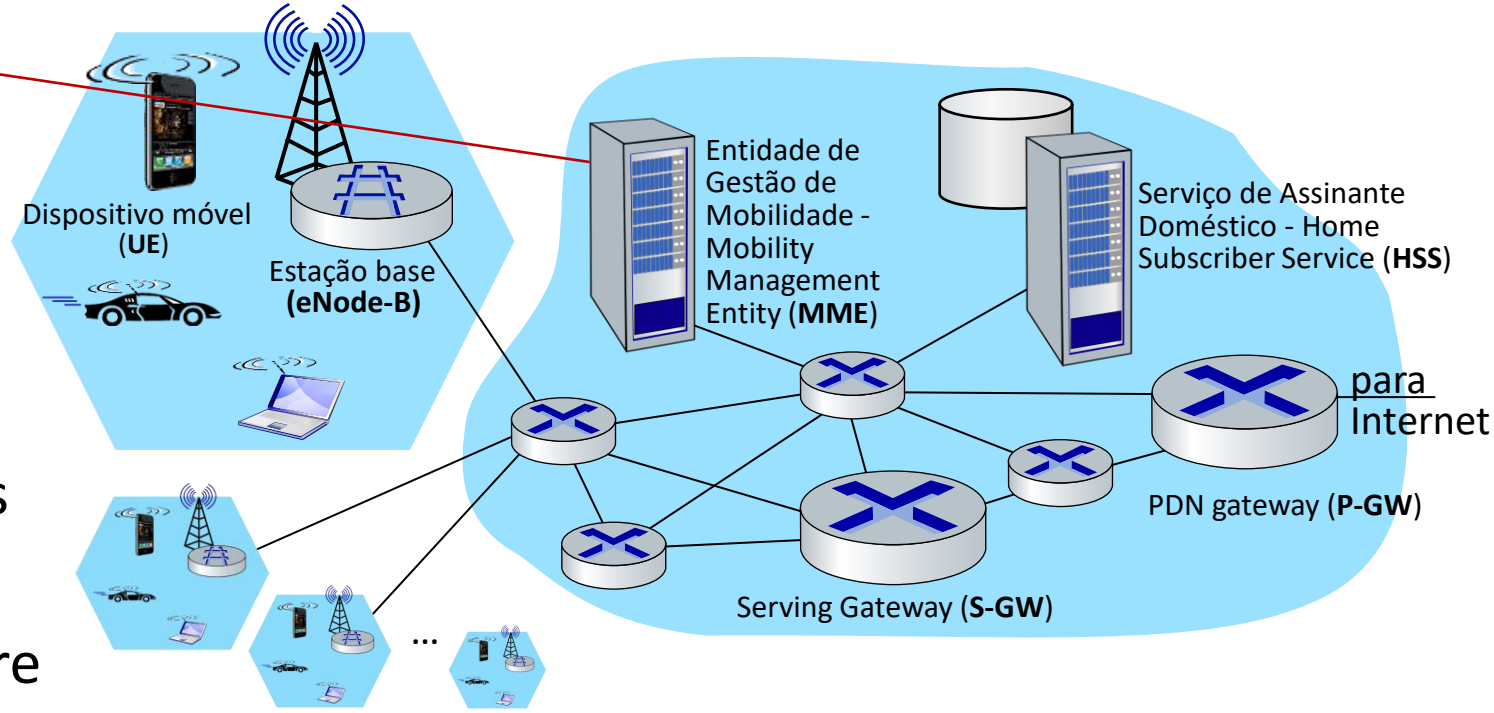
- fica no caminho de dados do celular para/da Internet
- P-GW
  - gateway para rede celular móvel
  - Parece com qualquer outro roteador de gateway de internet
  - fornece serviços de NAT
- outros roteadores:
  - uso extensivo de tunelamento



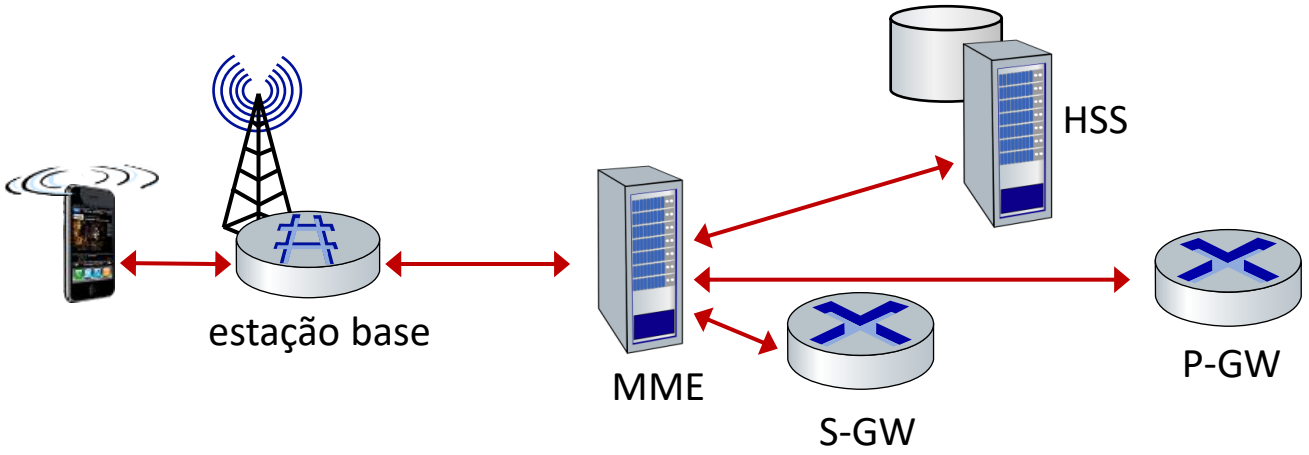
Elementos da arquitetura 4G LTE

Entidade de Gestão de Mobilidade

- autenticação de dispositivo (dispositivo para rede, rede para dispositivo) coordenada com rede de origem do dispositivo móvel (HSS)
- gerenciamento de dispositivos móveis:
  - handover de dispositivo entre células
  - rastreamento/paginação da localização do dispositivo
- configuração de caminho (túnel) do dispositivo móvel para P-GW

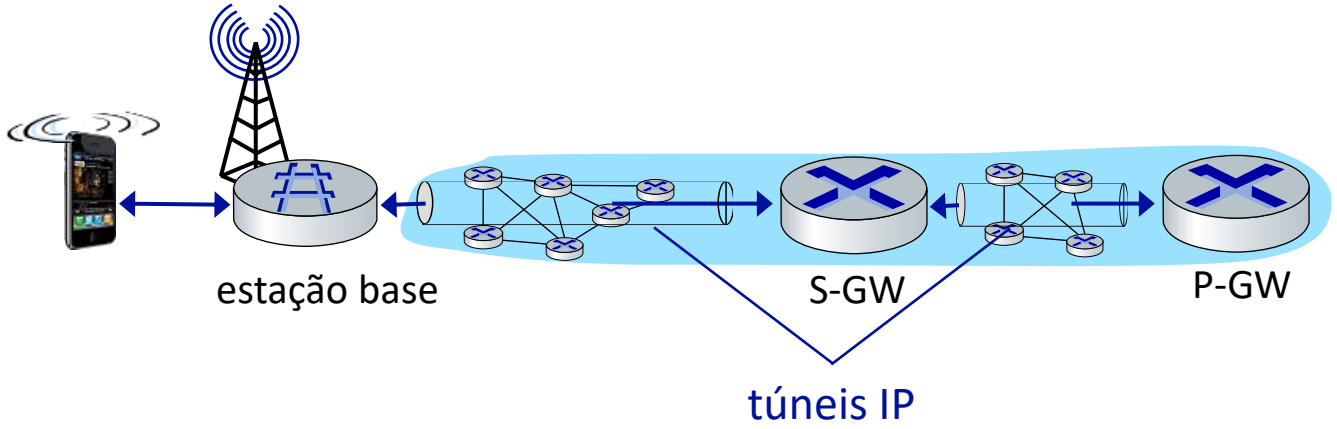


LTE: separação do plano de controle do plano de dados



plano de controle

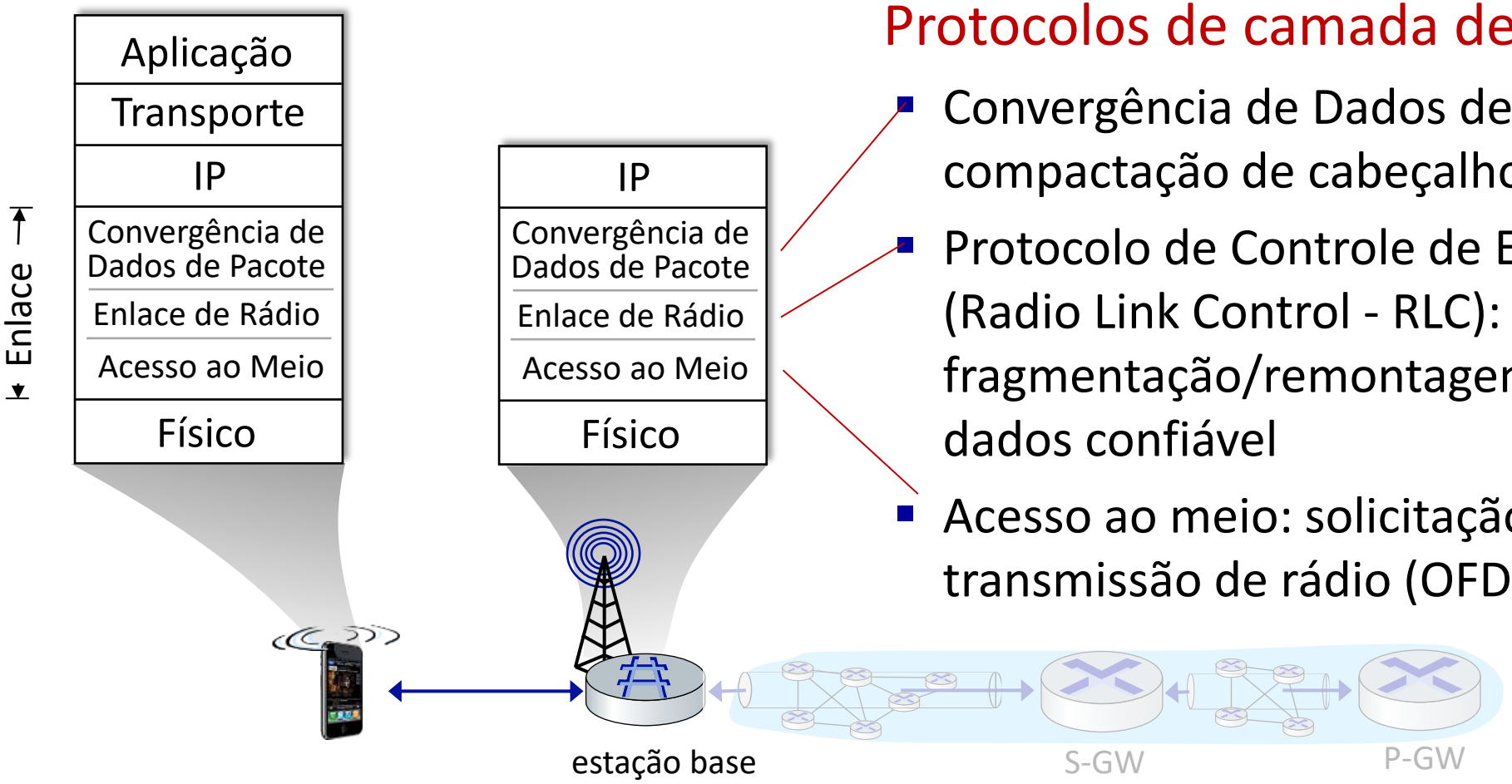
- novos protocolos para gerenciamento de mobilidade, segurança, e autenticação (mais tarde)



plano de dados

- novos protocolos nas camadas de enlace e física
- uso extensivo de tunelamento para facilitar a mobilidade

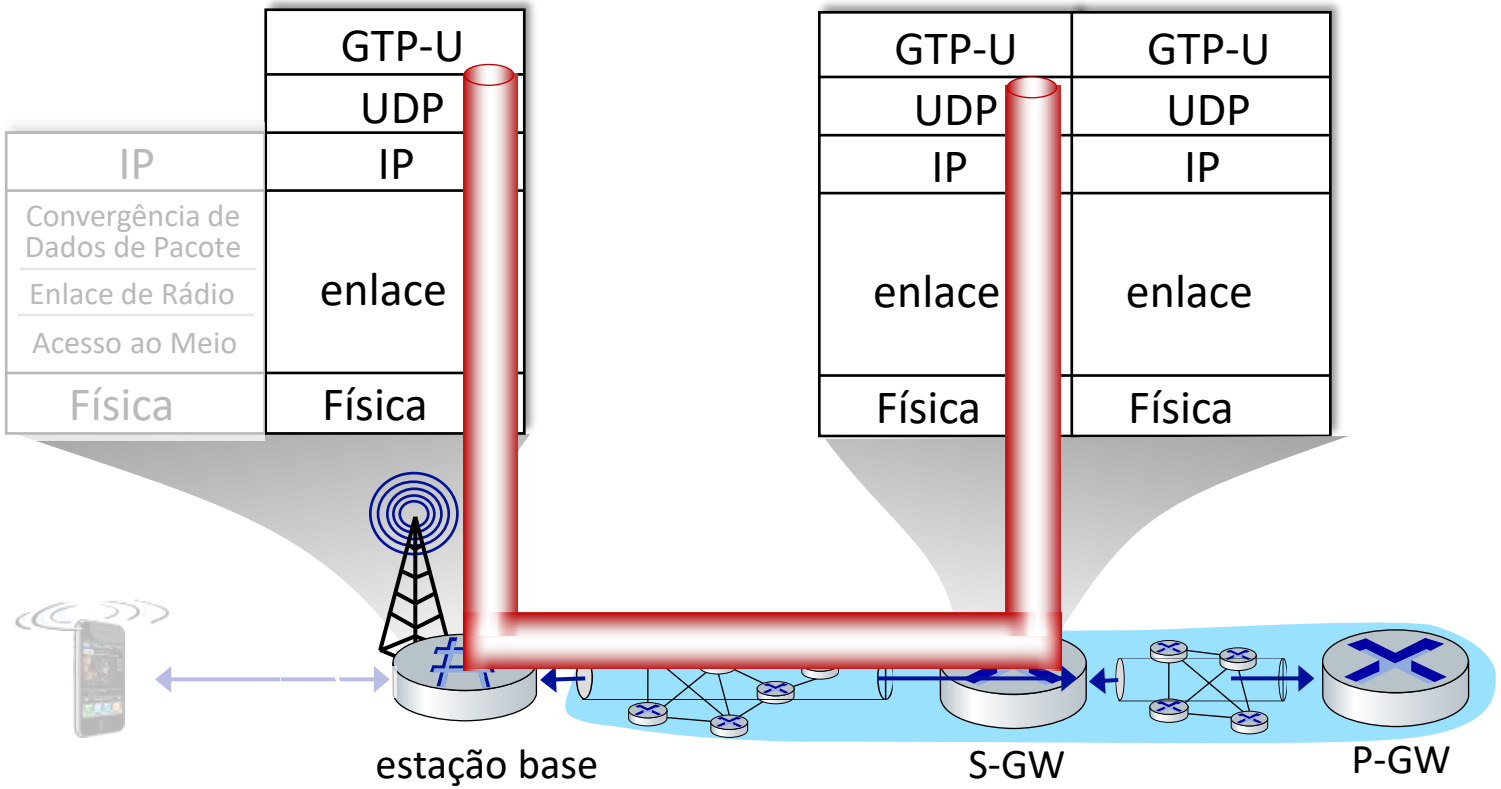
Pilha de protocolo do plano de dados do LTE: primeiro salto



Protocolos de camada de enlace do LTE :

- Convergência de Dados de Pacote: compactação de cabeçalho, criptografia
- Protocolo de Controle de Enlace de Rádio (Radio Link Control - RLC): fragmentação/remontagem, transferência de dados confiável
- Acesso ao meio: solicitação, uso de slots de transmissão de rádio (OFDM)

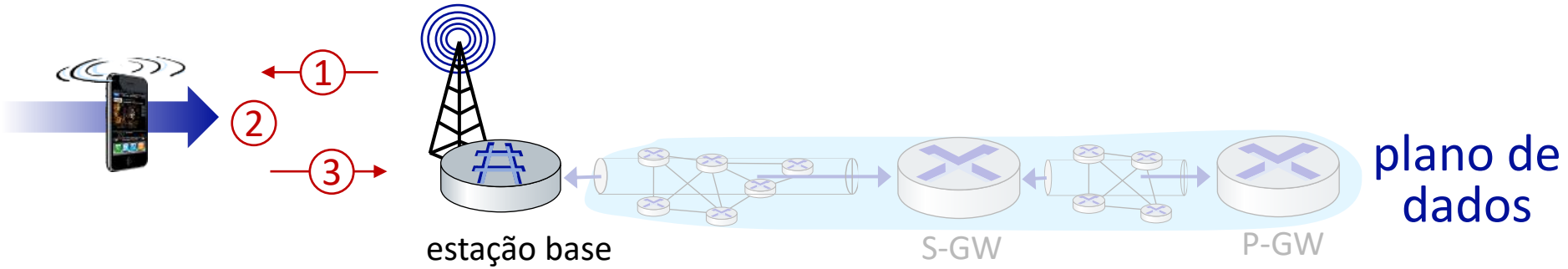
Pilha de protocolo do plano de dados do LTE: núcleo de pacotes



tunelamento:

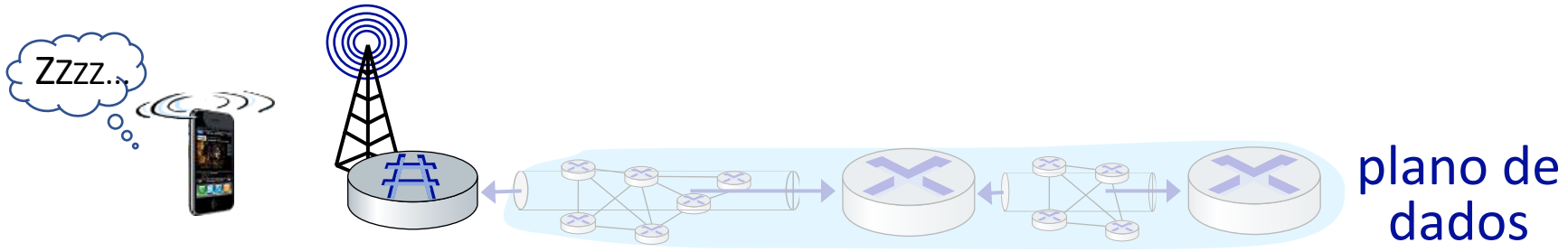
- datagrama móvel encapsulado usando GPRS Tunneling Protocol (GTP), enviado dentro do datagrama UDP para S-GW
- S-GW re-tunela datagramas para P-GW
- suporte à mobilidade: apenas os *endpoints* de tunelamento mudam quando o usuário móvel se move

Plano de dados do LTE: associando-se a um BS



1. BS transmite sinal de sincronização primário a cada 5 ms em todas as frequências
   - BSs de várias operadoras podem estar transmitindo sinais de sincronização
2. o celular encontra um sinal de sincronização primário e, em seguida, localiza o segundo sinal de sincronização nesta frequência.
   - o celular então encontra as informações transmitidas pela BS: largura de banda do canal, configurações; informações da operadora de celular da BS
   - o celular pode obter informações de várias estações base e várias redes celulares
3. o celular seleciona com qual BS se associar (por exemplo, preferência pela operadora doméstica)
4. ainda são necessárias mais etapas para autenticar, estabelecer o estado, configurar o plano de dados

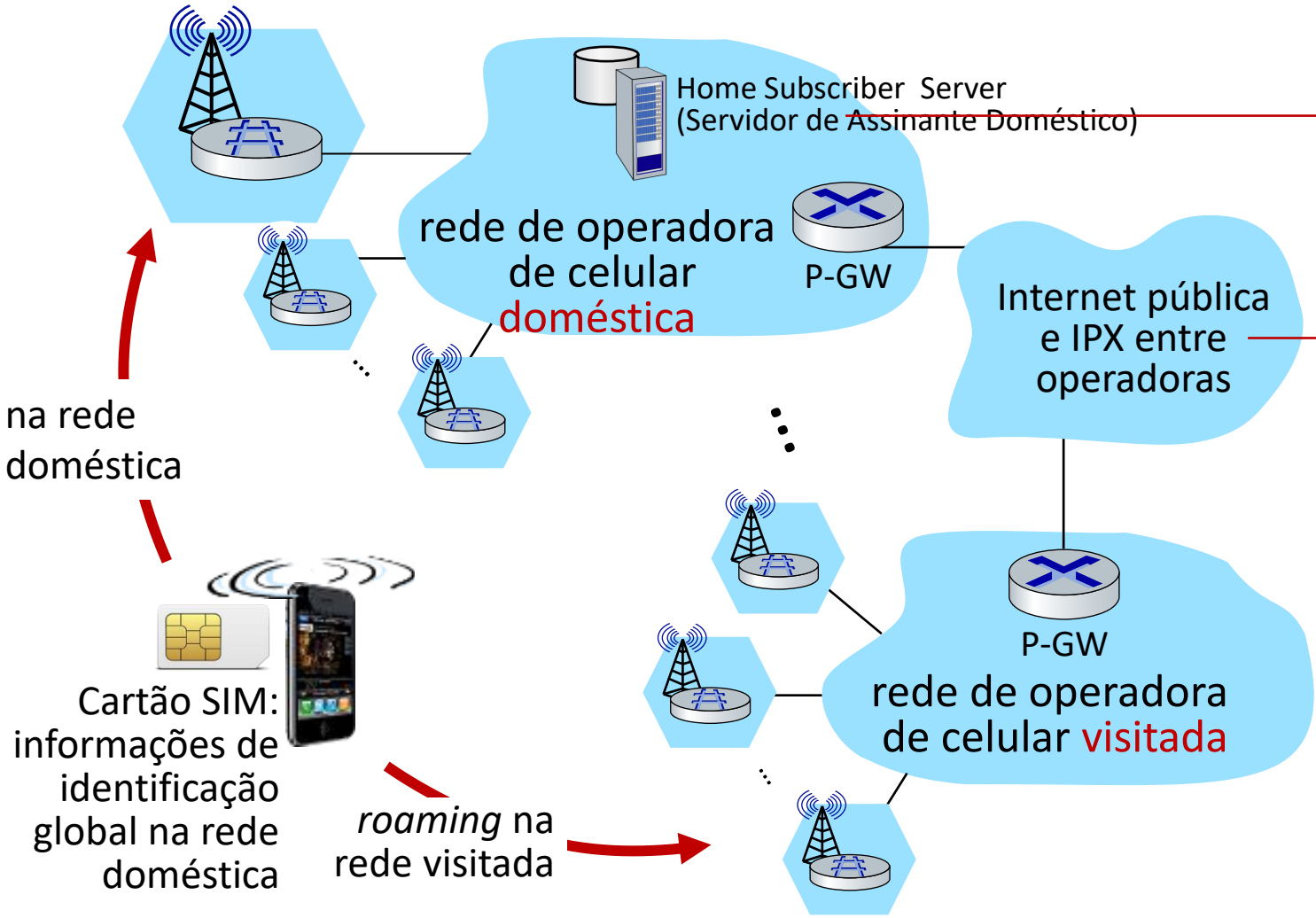
Celulares LTE: modos de suspensão



como em WiFi e Bluetooth: o celular LTE pode colocar o rádio para "dormir" para economizar bateria:

- sono leve (*light sleep*): após centenas de milissegundos de inatividade
  - acorda periodicamente (centenas de milissegundos) para verificar se há transmissões *downstream*
- sono profundo (*deep sleep*): após 5-10 segundos de inatividade
  - celular pode mudar de células durante o sono profundo - precisa restabelecer a associação

Rede celular global: uma rede de redes IP



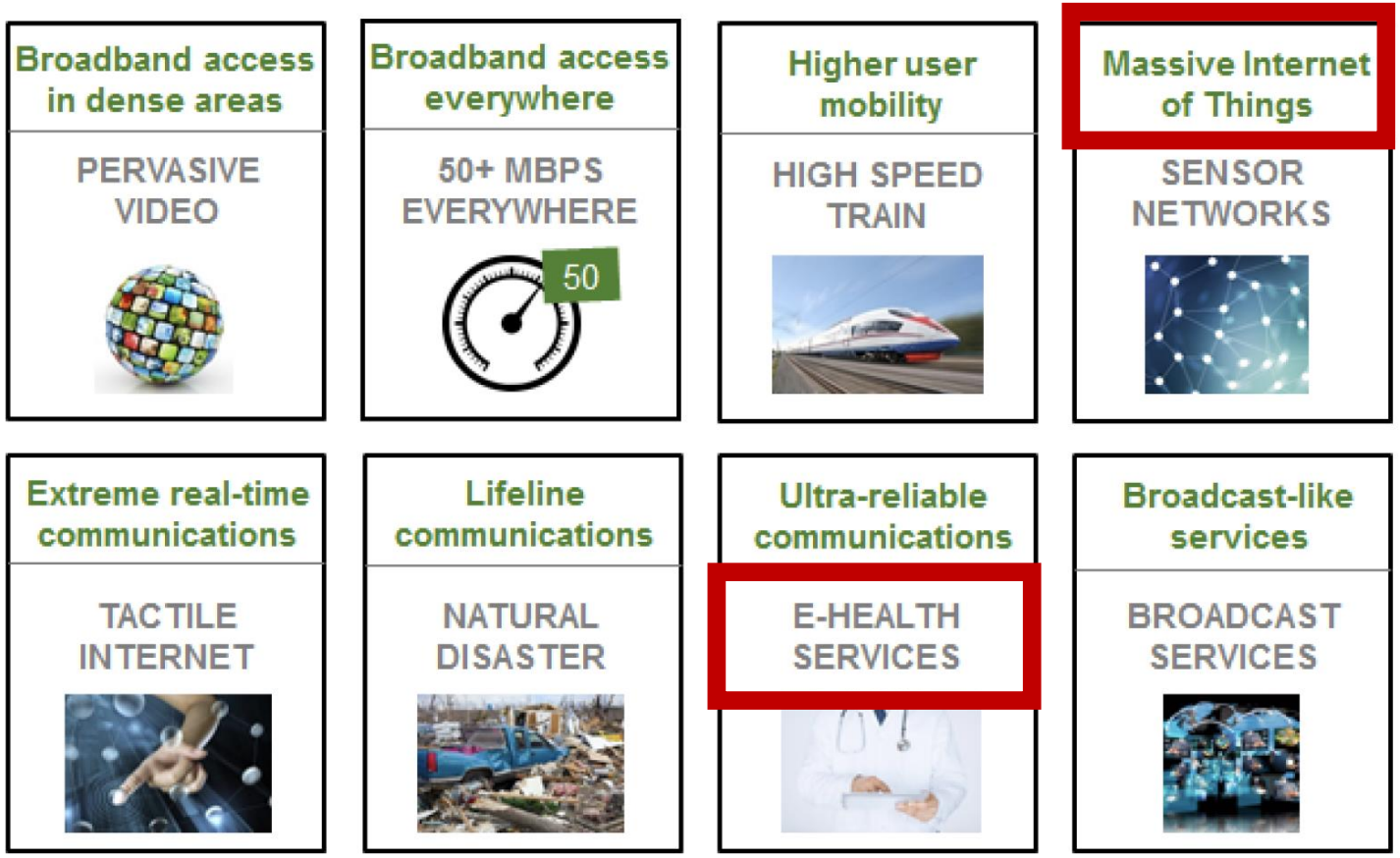
rede doméstica do HSS:

- informações de identificação e serviços enquanto na rede doméstica e em roaming

todo IP:

- as operadoras se interconectam e se conectam à internet pública nos pontos de troca
- 2G e 3G legado: nem todo IP, tratado de outra forma

Rumo ao 5G: motivação



From Next Generation Mobile Networks (NGMS) alliance: 2020 white paper

Hype/desejos precisam ser separados da realidade ou provavelmente da realidade de curto prazo

Rumo ao 5G: motivação

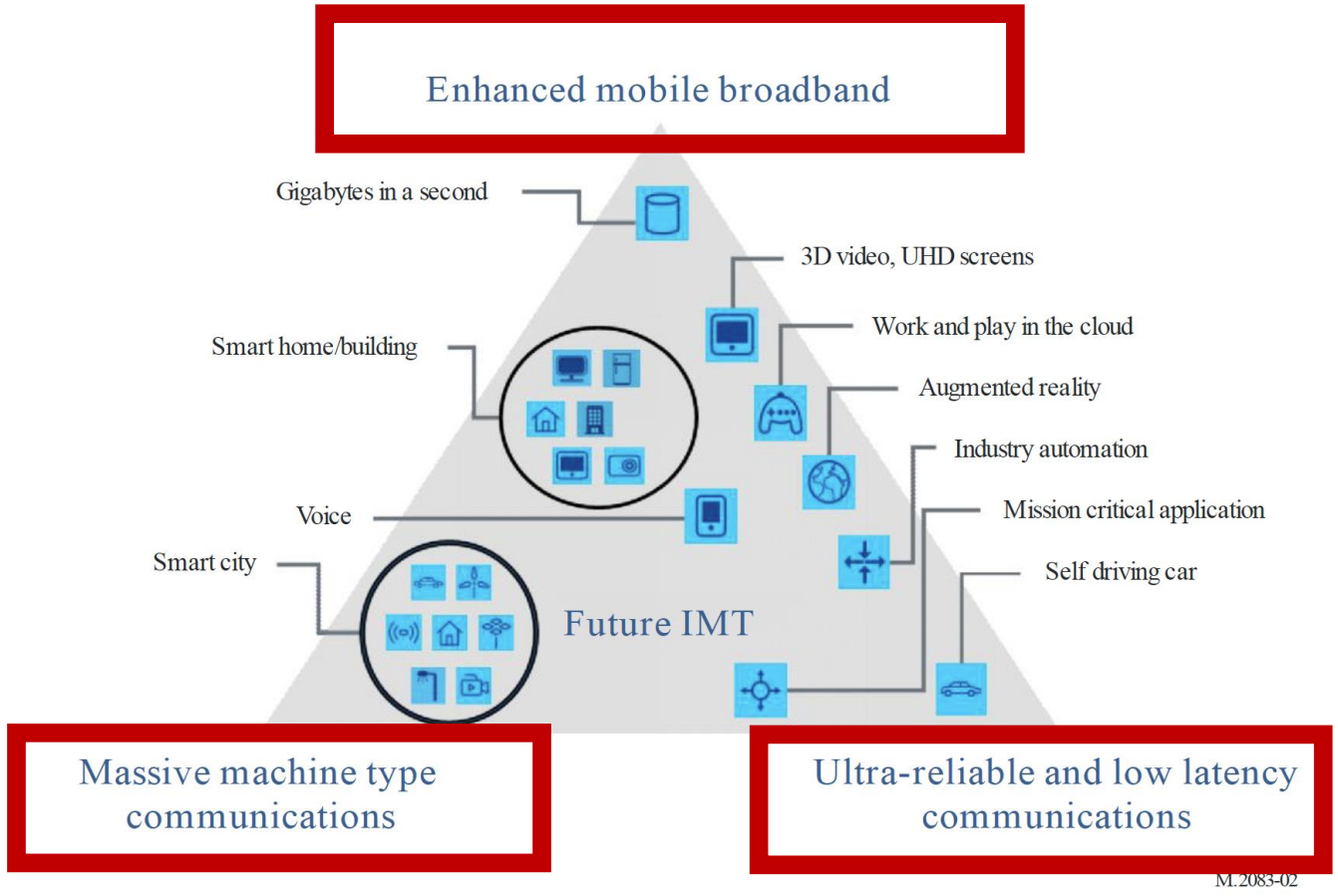
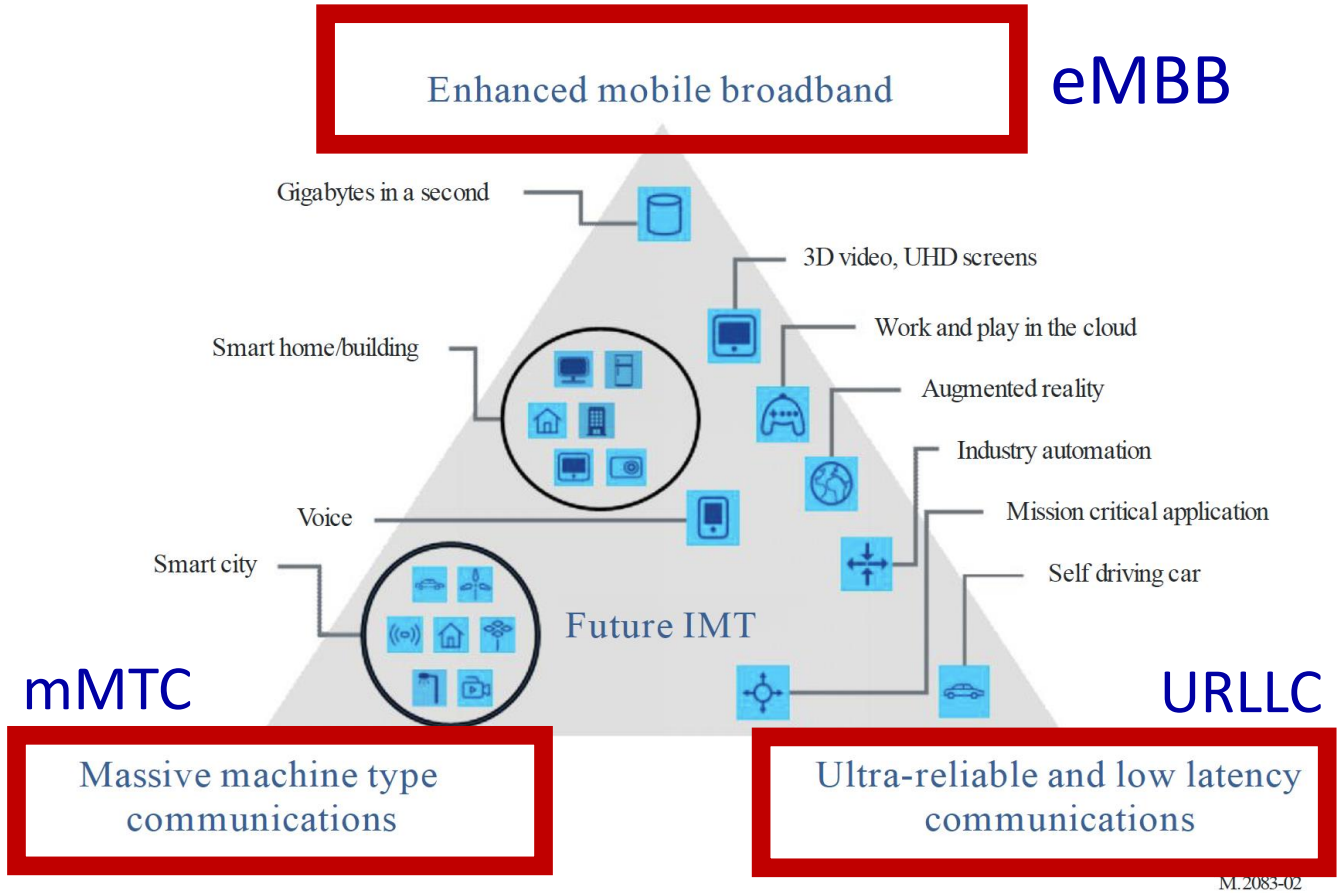


Figure: from Recommendation ITU-R M.2083-0 (2015)

"Os padrões e lançamentos iniciais concentraram-se principalmente na banda larga móvel aprimorada. Espera-se que o 5G possibilite cada vez mais novos modelos de negócios e inúmeros novos casos de uso, em particular aqueles de comunicações massivas do tipo máquina e comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência."

Rumo ao 5G: motivação



Verticais da indústria:

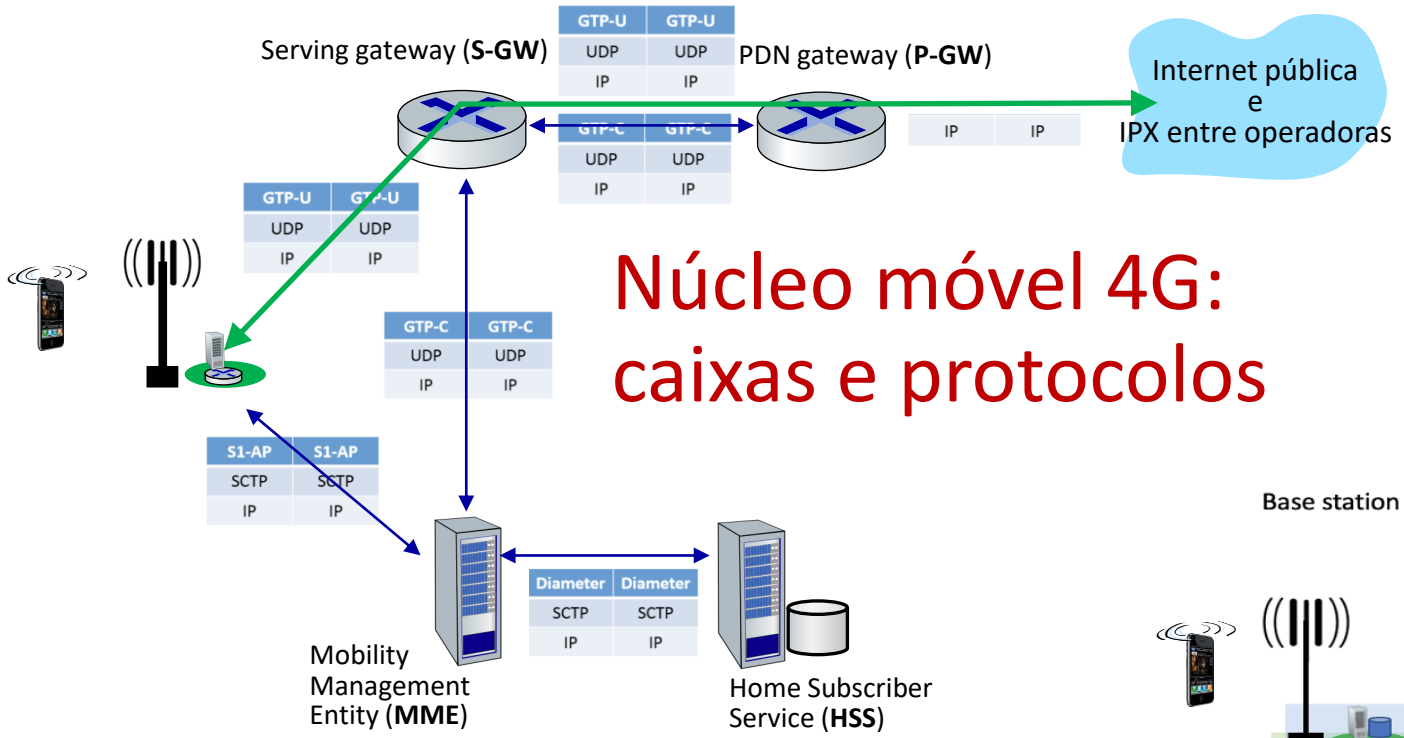
- Fabricação
- Construções
- Transporte
- Saúde
- Comunidades inteligentes
- Educação
- Turismo
- Agricultura
- Finanças

K. Schwab, “The Fourth Industrial Revolution,” World Economic Forum.

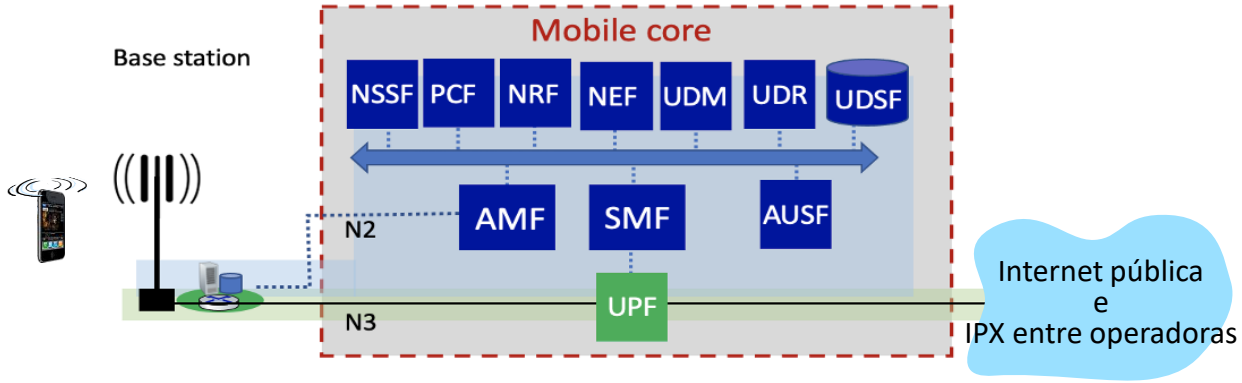
Rumo ao 5G!

- objetivo: aumento de 10 vezes na taxa de bits de pico, redução de 10 vezes na latência, aumento de 100 vezes na capacidade de tráfego em comparação com o 4G
- 5G NR (new radio):
  - duas bandas de frequência: FR1 (450 MHz–6 GHz) e FR2 (24 GHz–52 GHz): frequências de ondas milimétricas
  - não retrocompatível com 4G
  - MIMO: múltiplas antenas direcionais
- frequências de ondas milimétricas: taxas de dados muito mais altas, mas em distâncias mais curtas
  - picocélulas: diâmetros das células: 10-100 m
  - implantação massiva e densa de novas estações base é necessária

Rumo ao 5G: arquitetura semelhante a SDN

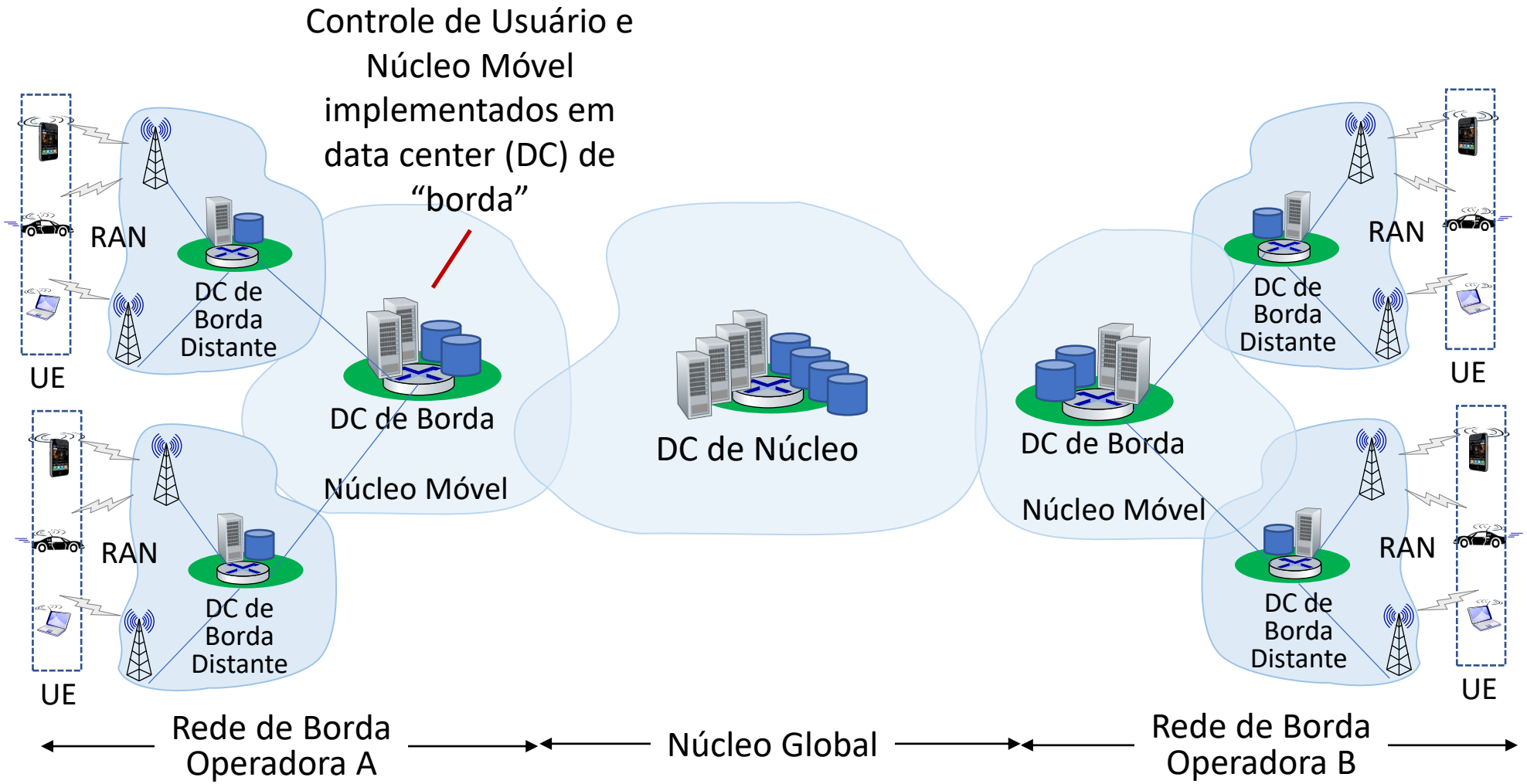


Núcleo móvel 4G: caixas e protocolos

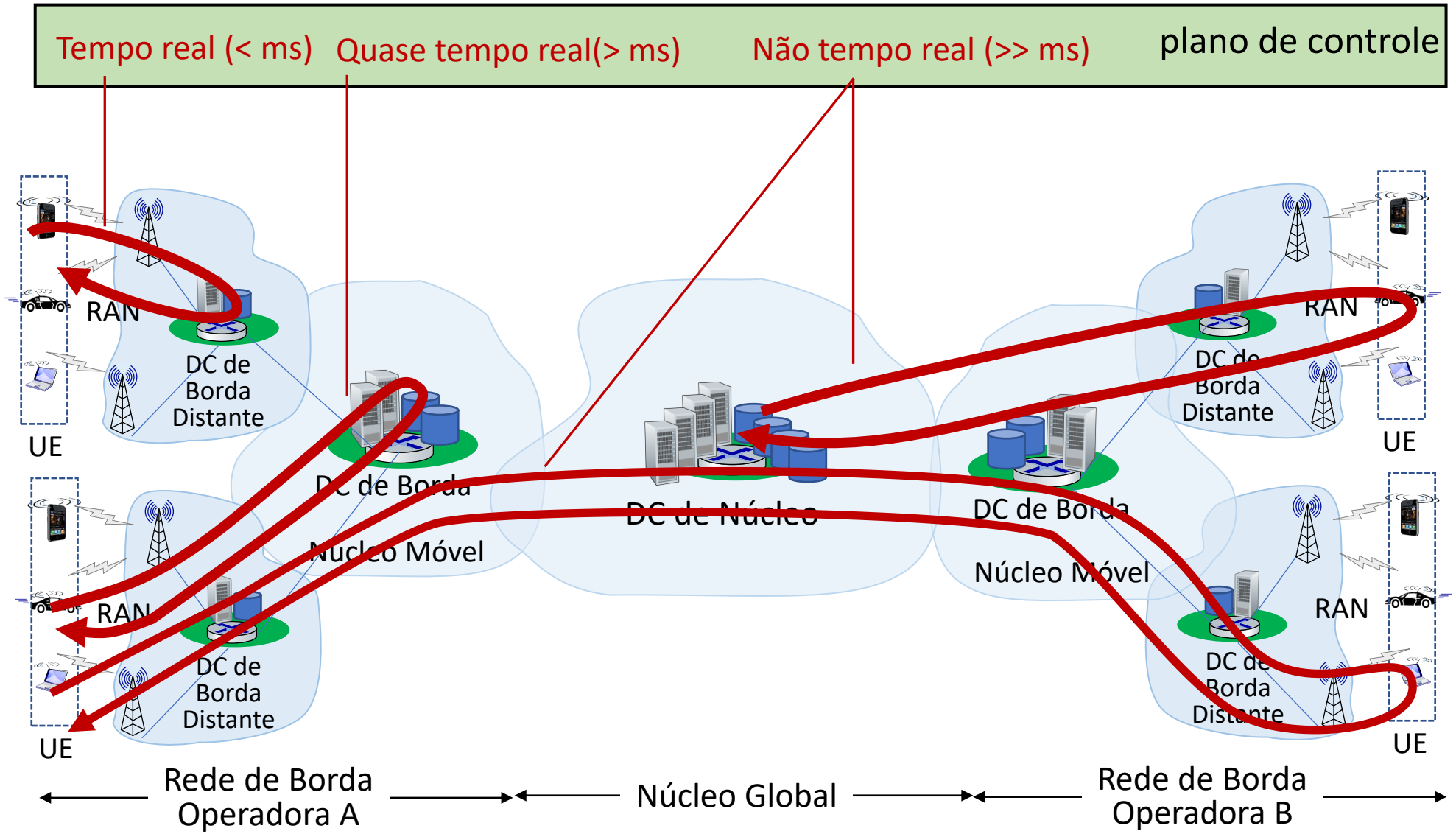


5G: arquitetura semelhante a microsserviços

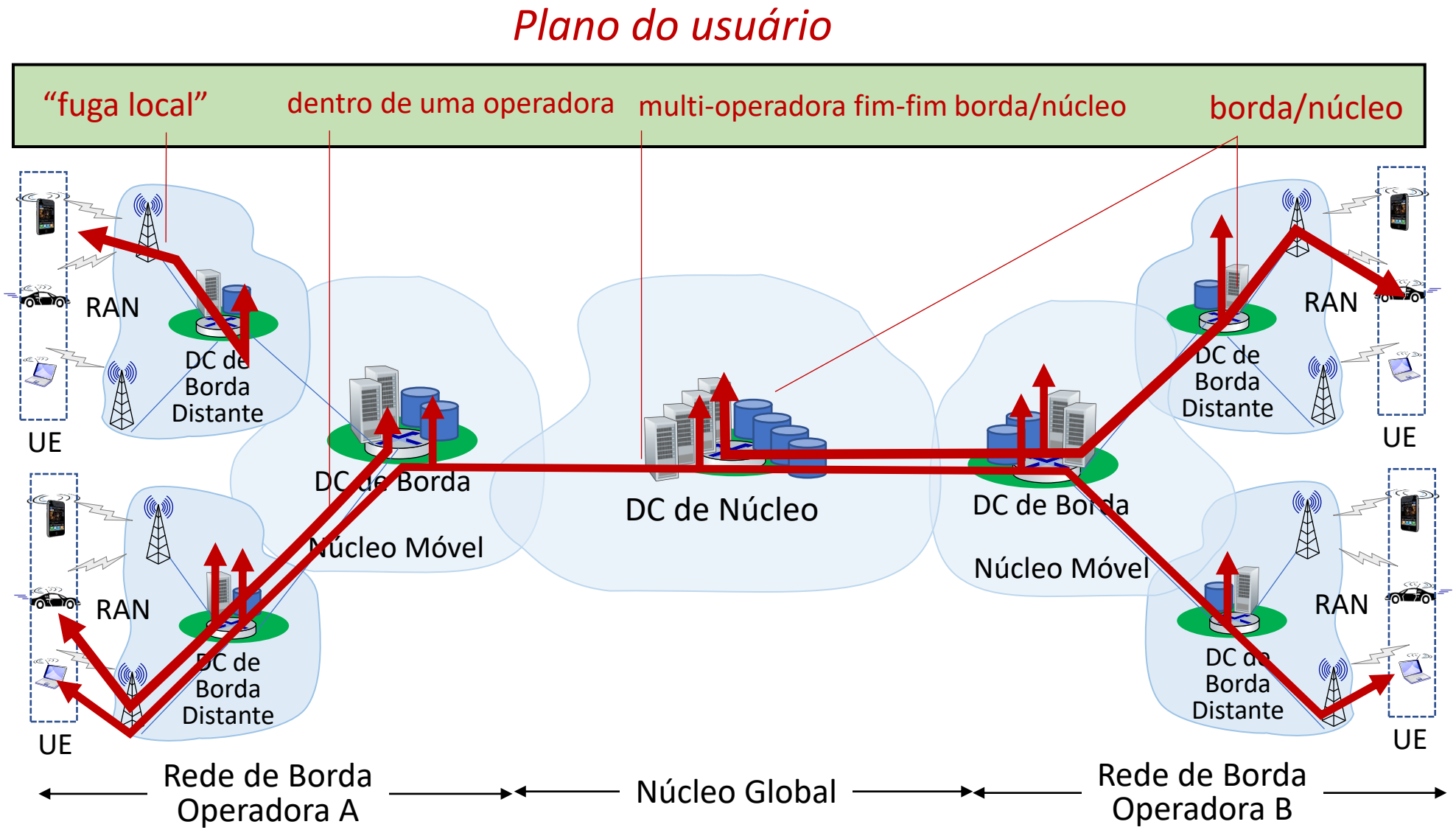
Elementos funcionais: comunicação, computação, dados



Plano de controle: controle de recursos



Plano do usuário: recursos, conforme usados pelos usuários (aplicações)



Além do 5G?

- “6G” não é obviamente o próximo: “NextG” e “Beyond 5G” ouvidos com mais frequência do que “6G”
- 5G em um caminho evolutivo (como a Internet)
  - agilidade: tecnologias de nuvem (SDN) significam que novos recursos podem ser introduzidos rapidamente e implantados continuamente
  - personalização: mudanças podem ser introduzidas de baixo para cima (por exemplo, por empresas e parceiros de nuvem de borda com 5G privado)
    - Não há necessidade de esperar pela padronização
    - Não há necessidade de chegar a um acordo (entre todas as partes interessadas)

Capítulo 7: roteiro

- Introdução

Sem Fio

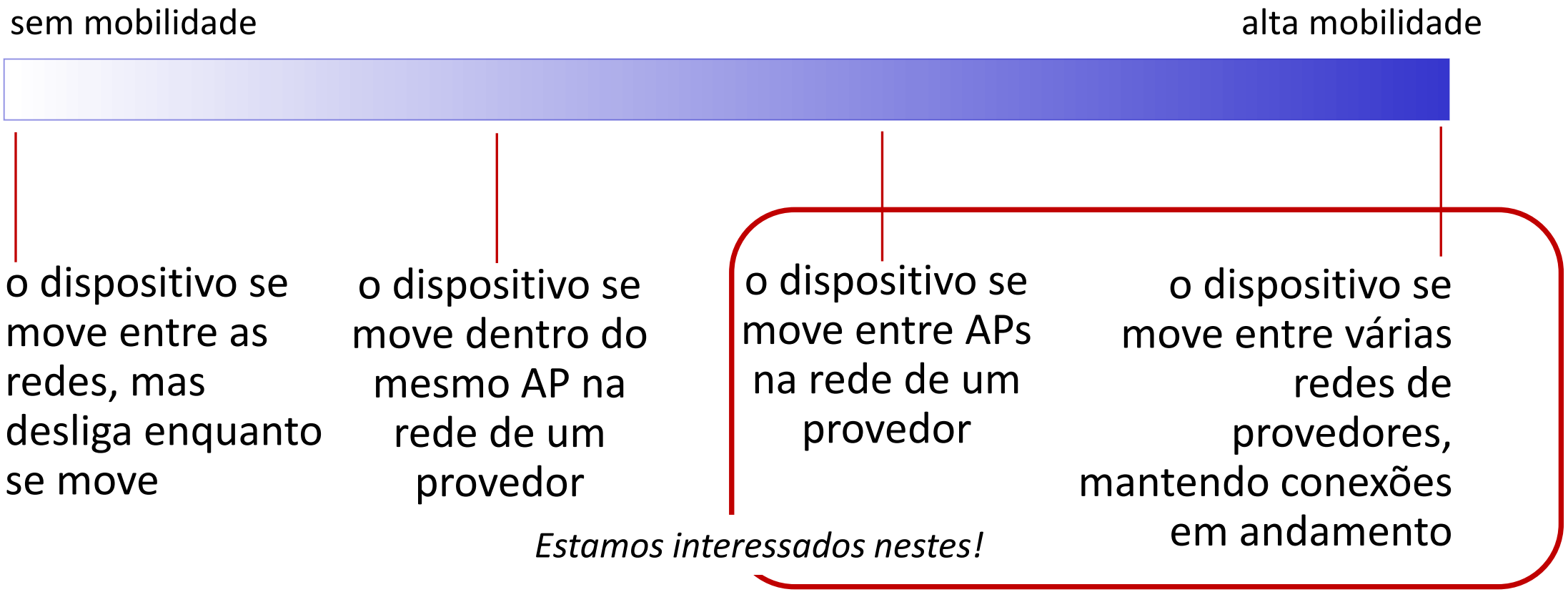
- Enlaces Sem Fio e características de rede
- WiFi: LANs sem fio 802.11
- Redes Celulares: 4G e 5G

Mobilidade

- Gestão da mobilidade: princípios
- Gestão da mobilidade: prática
  - Redes 4G/5G
  - IP Móvel
- Mobilidade: impacto em protocolos de camadas superiores

O que é mobilidade?

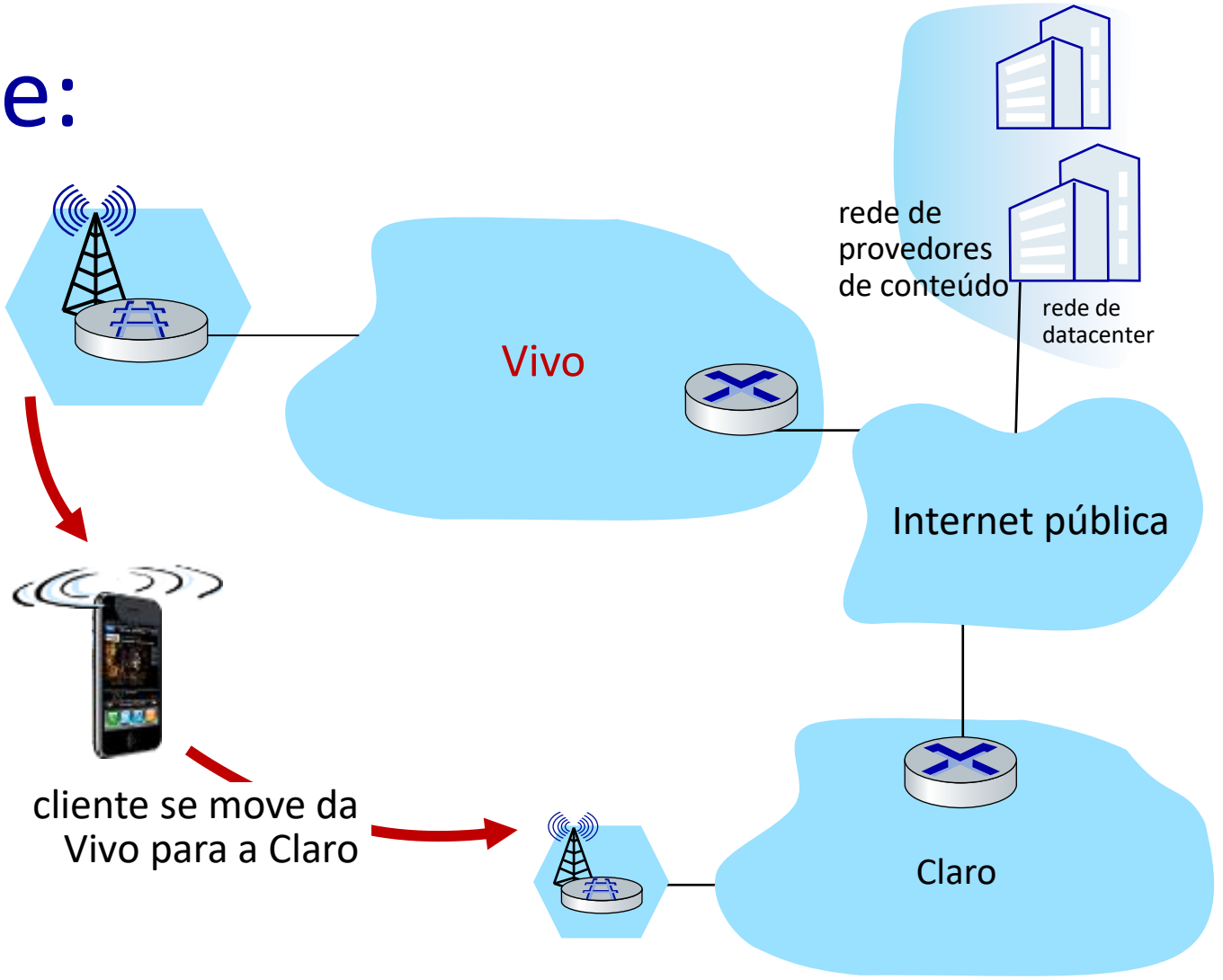
- espectro da mobilidade, do ponto de vista da rede:



Desafio de mobilidade:

Se um dispositivo passar de uma rede para outra:

- Como a “rede” saberá encaminhar pacotes para a *nova* rede?

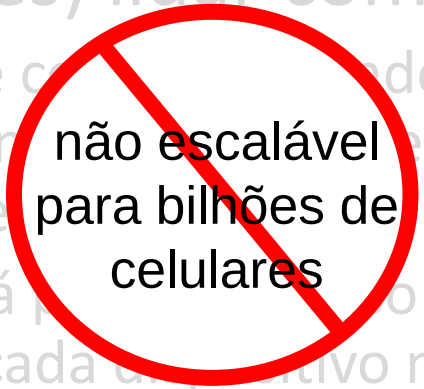


Abordagens de mobilidade

- deixe a rede (roteadores) lidar com isso:
  - roteadores anunciam nome conhecido, endereço (por exemplo, endereço IP permanente de 32 bits) ou número (por exemplo, número da célula) do nó móvel visitante por meio de troca de tabela de roteamento usual
  - O roteamento da Internet já pode fazer isso *sem alterações*! As tabelas de roteamento indicam onde cada dispositivo móvel está localizado por correspondência de prefixo mais longo!

Abordagens de mobilidade

- deixe a rede (roteadores) lidar com isso:
  - roteadores anunciam nome c… dereço (por exemplo, endereço IP permanente de 32 bits) ou n… mplo, número da célula) do nó móvel visitante por meio de… de roteamento usual
  - O roteamento da Internet já p… o *sem alterações*! As tabelas de roteamento indicam onde cada d… tivo móvel está localizado por correspondência de prefixo mais longo!



- deixe os sistemas finais cuidarem disso: funcionalidade na "borda"
  - *roteamento indireto:* a comunicação do correspondente para o celular passa pela rede doméstica e depois é encaminhada para o celular remoto
  - *roteamento direto:* correspondente obtém endereço estrangeiro do celular, envia diretamente para o celular

Entrando em contato com um amigo móvel:

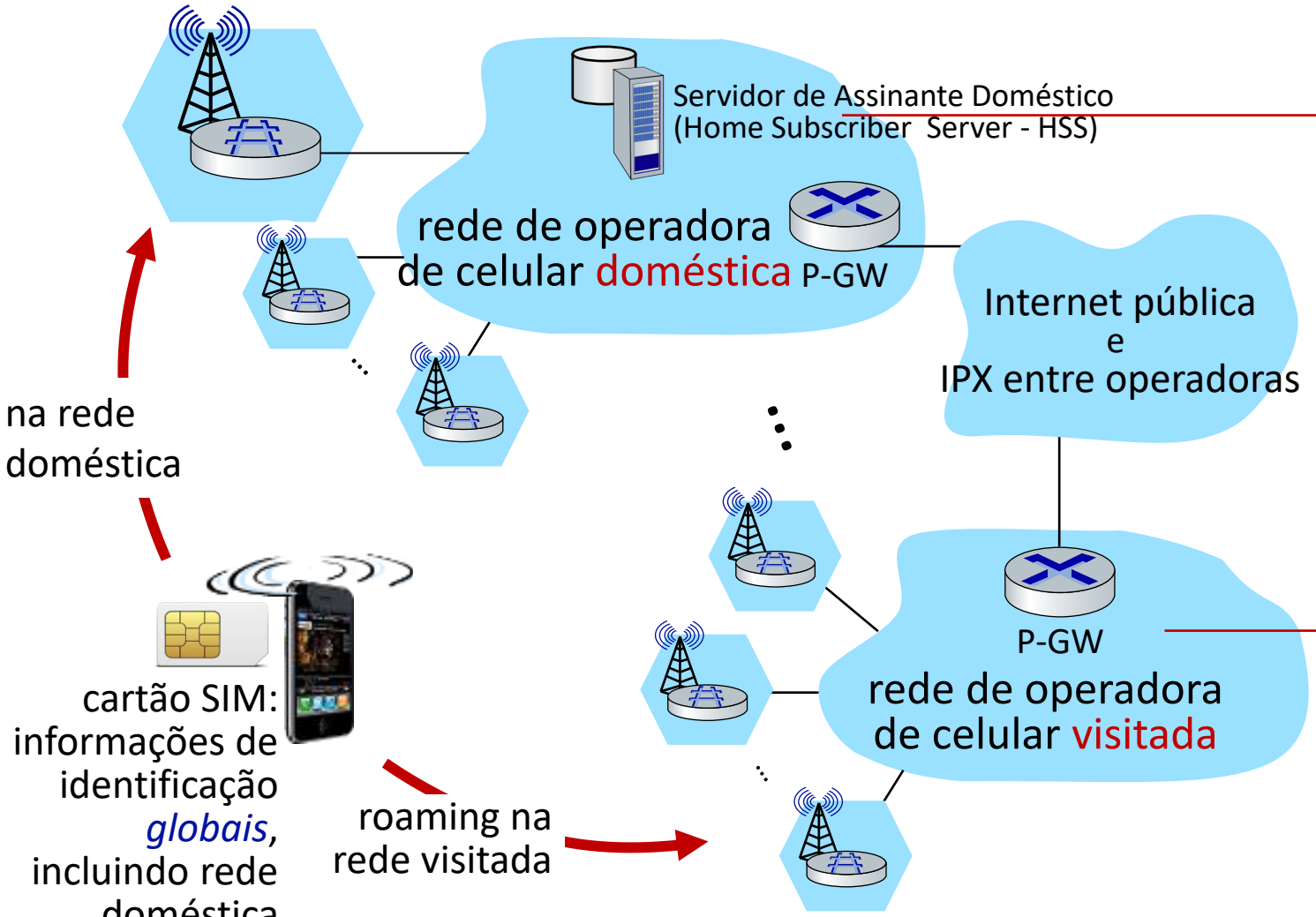
Considere uma amiga que muda de local com frequência, como você a encontra?

- pesquisa todas as listas telefônicas?
- espera que ela lhe diga onde ela está?
- liga para os pais dela?
- Facebook!

A importância de ter uma “casa”:

- uma fonte definitiva de informações sobre você
- um lugar onde as pessoas podem descobrir onde você está

Rede doméstica, rede visitada: 4G/5G



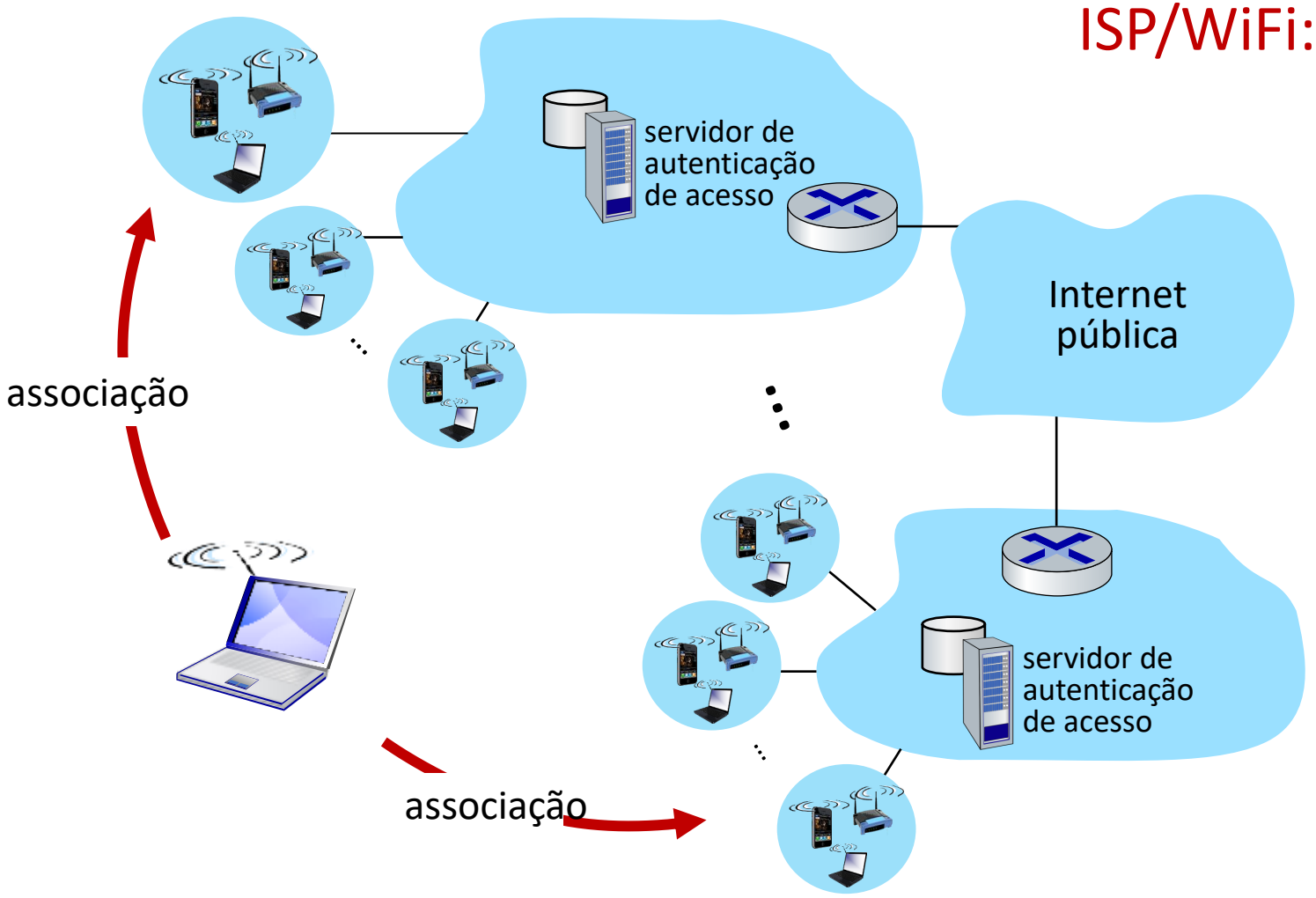
rede doméstica:

- plano de serviço (pago) com provedor de celular, por exemplo, Vivo, Claro
- HSS da rede doméstica armazena informações de identidade e serviços

rede visitada:

- qualquer rede que não seja sua rede doméstica
- contrato de serviço com outras redes: para fornecer acesso a visitantes móveis

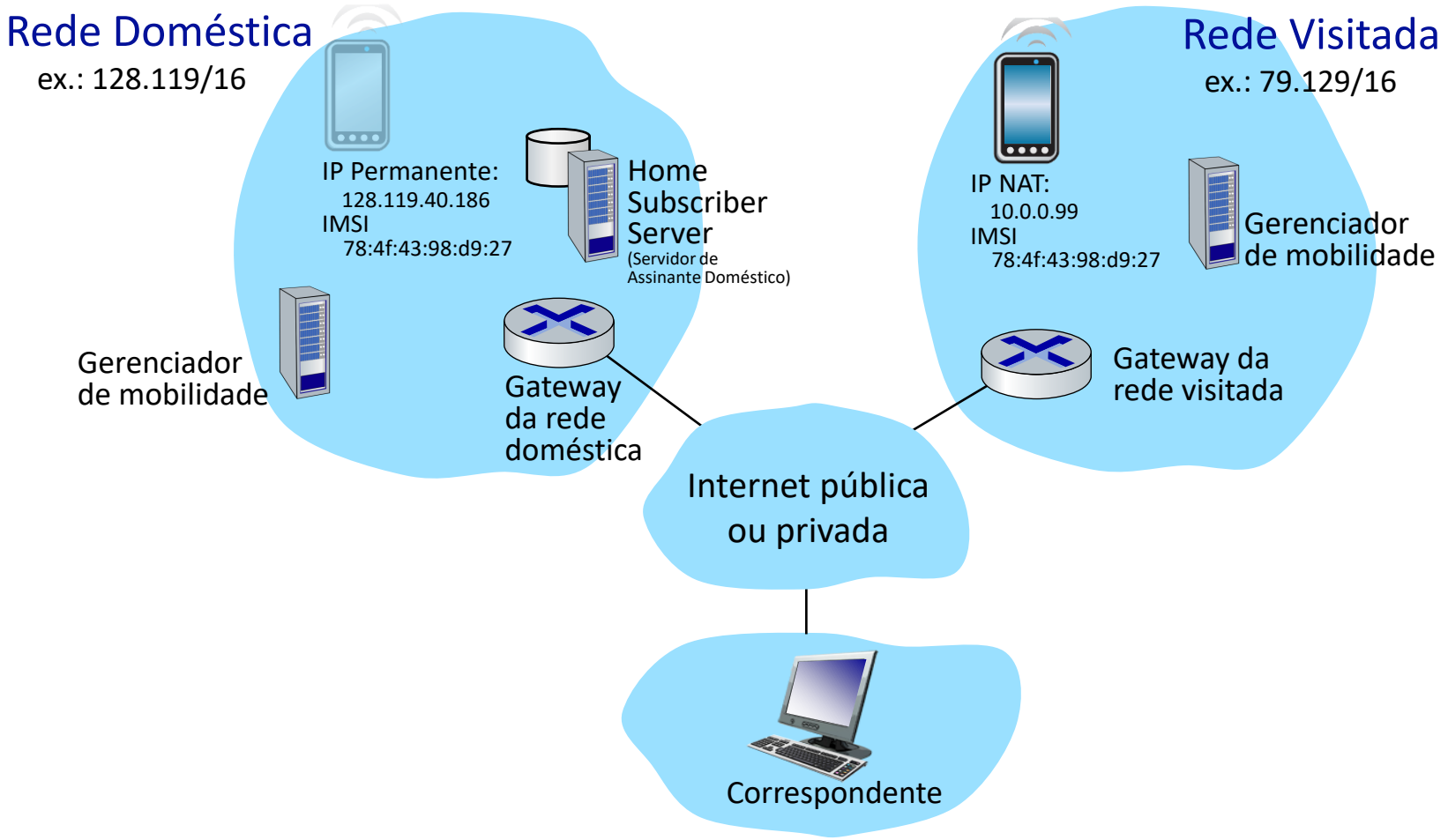
Rede doméstica, rede visitada: ISP/WiFi



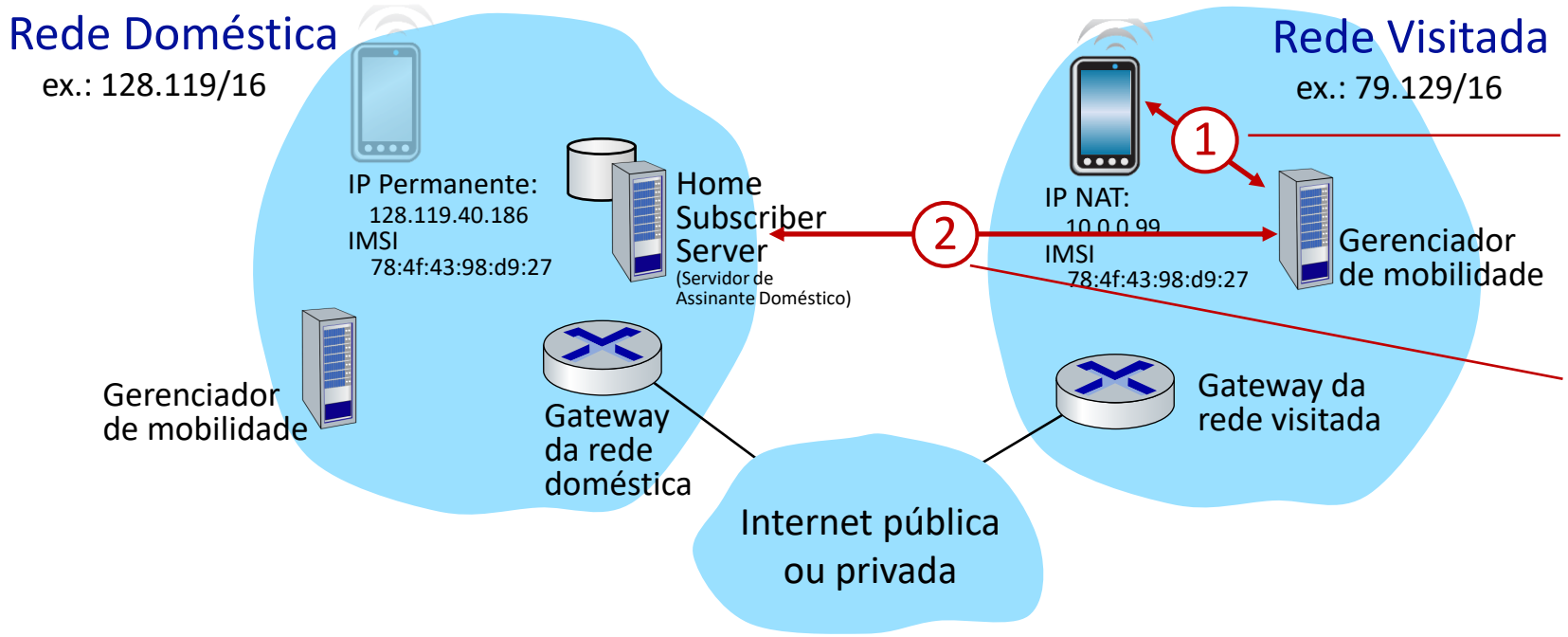
ISP/WiFi: sem noção de "casa" global

- credenciais do ISP (por exemplo, nome de usuário, senha) armazenadas no dispositivo ou com o usuário
- ISPs podem ter presença nacional e internacional
- redes diferentes: credenciais diferentes
  - algumas exceções (por exemplo, eduroam)
  - existem arquiteturas (IP móvel) para mobilidade semelhante ao 4G, mas não são usadas

Rede doméstica, rede visitada: genericamente



Registro: casa precisa saber onde você está!



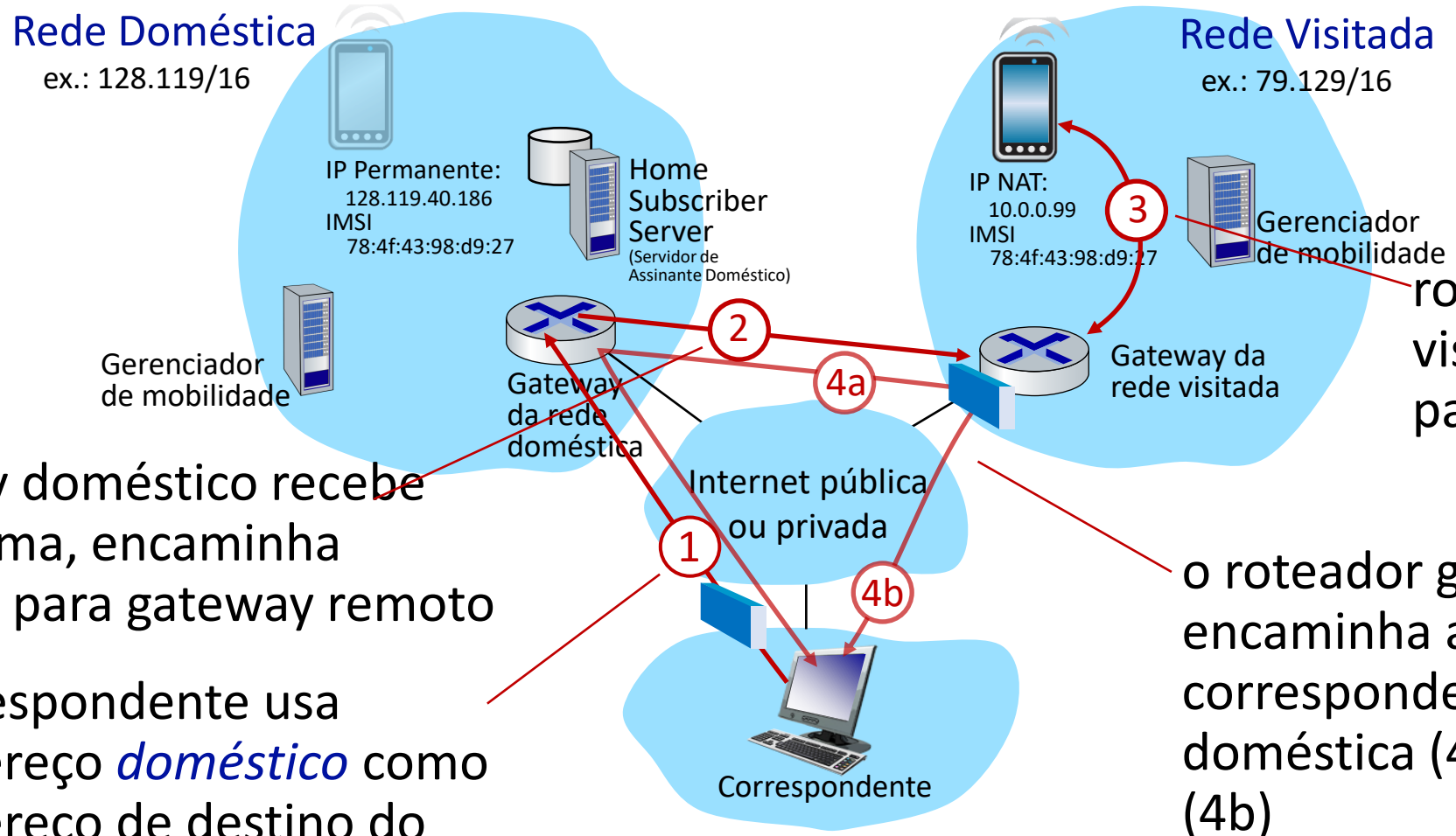
dispositivo móvel *se associa* com gerenciador de mobilidade visitado

gerenciador de mobilidade visitado *registra* a localização do dispositivo móvel com o HSS doméstico

resultado final:

- o gerenciador de mobilidade visitado sabe sobre dispositivos móveis
- HSS doméstico sabe a localização do dispositivo móvel

Mobilidade com roteamento indireto



roteador gateway visitado encaminha para dispositivo móvel

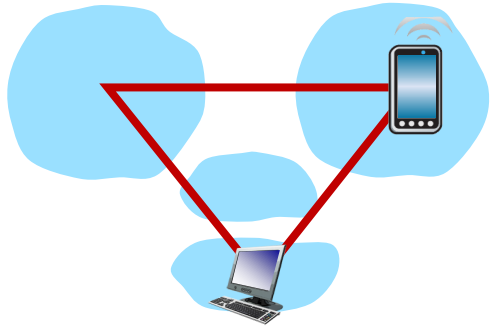
gateway doméstico recebe datagrama, encaminha (tunela) para gateway remoto

correspondente usa endereço *doméstico* como endereço de destino do datagrama

o roteador gateway visitado encaminha a resposta ao correspondente via rede doméstica (4a) ou diretamente (4b)

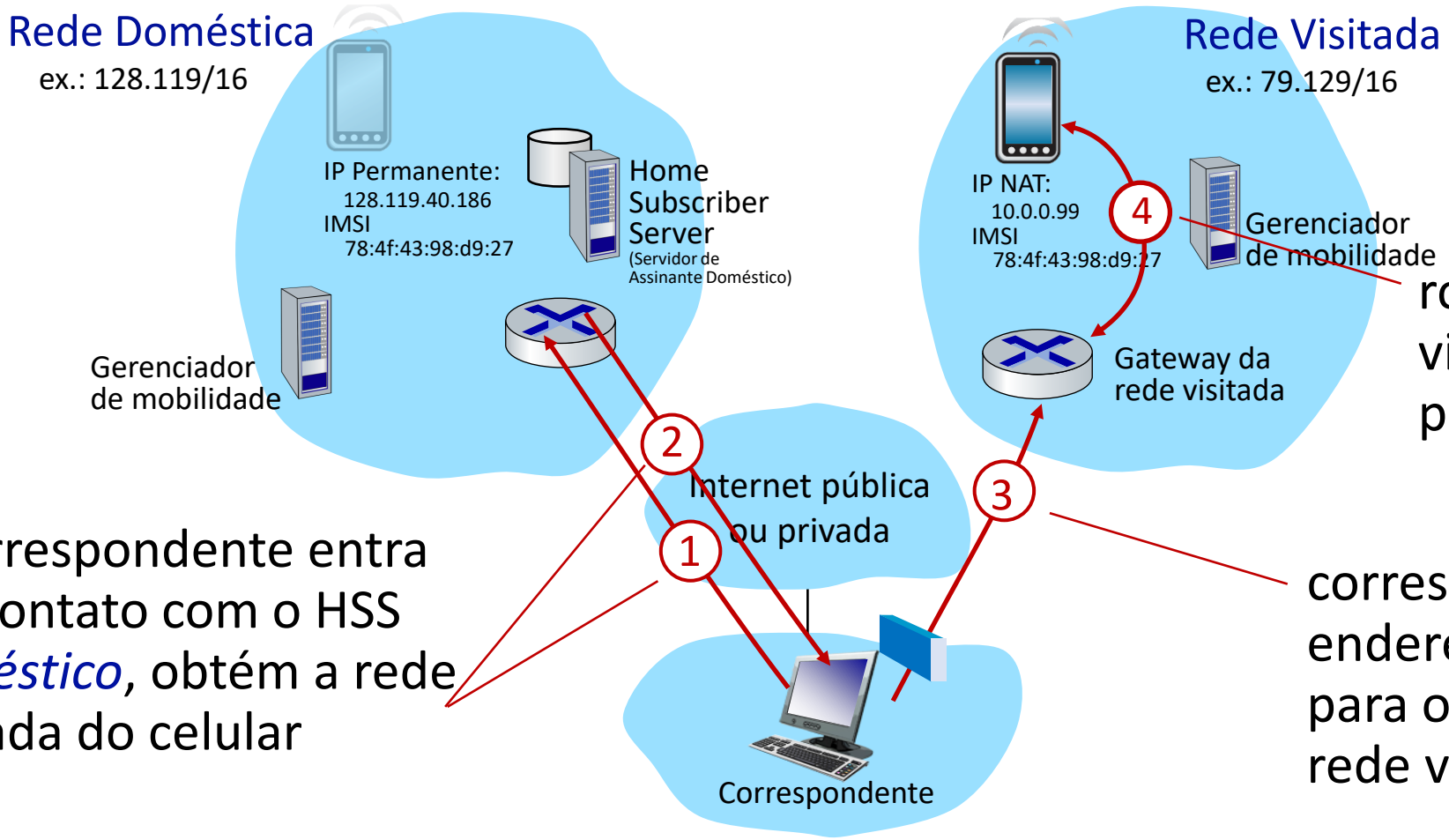
Mobilidade com roteamento indireto: comentários

- roteamento triangular:
  - ineficiente quando correspondente e dispositivo móvel estão na mesma rede



- dispositivo móvel se move entre redes visitadas: transparente para o correspondente!
  - se registra na nova rede visitada
  - nova rede visitada se registra com o HSS doméstico
  - os datagramas continuam a ser encaminhados da rede doméstica para o dispositivo móvel na nova rede
  - *conexões em andamento (por exemplo, TCP) entre o correspondente e o dispositivo móvel podem ser mantidas!*

Mobilidade com roteamento direto



roteador gateway visitado encaminha para dispositivo móvel

o correspondente entra em contato com o HSS *doméstico*, obtém a rede visitada do celular

correspondente endereça datagrama para o endereço da rede visitada

Mobilidade com roteamento direto: comentários

- supera ineficiências do roteamento triangular
- *não transparente para o correspondente:* o correspondente deve obter o endereço temporário (endereço da rede visitada) através do agente doméstico
- e se o dispositivo móvel mudar de rede visitada?
  - pode ser manipulado, mas com complexidade adicional

Capítulo 7: roteiro

- Introdução

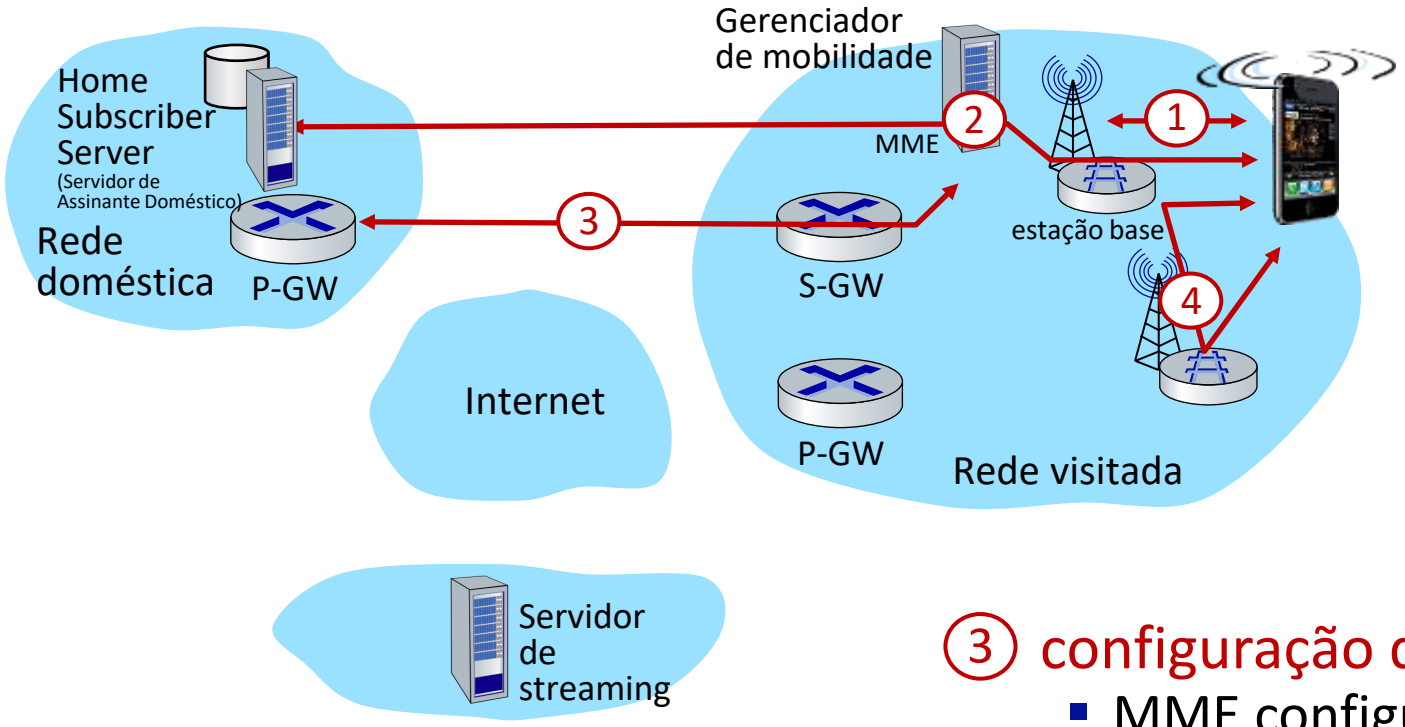
Sem Fio

- Enlaces Sem Fio e características de rede
- WiFi: LANs sem fio 802.11
- Redes Celulares: 4G e 5G

Mobilidade

- Gestão da mobilidade: princípios
- Gestão da mobilidade: prática
  - Redes 4G/5G
  - IP Móvel
- Mobilidade: impacto em protocolos de camadas superiores

Mobilidade em redes 4G: principais tarefas de mobilidade



① associação com estação base:

- coberto anteriormente
- dispositivo móvel fornece IMSI – identificando a si mesmo e a sua rede doméstica

② configuração do plano de controle:

- MME e HSS doméstico estabelecem estado do plano de controle – dispositivo móvel está na rede visitada

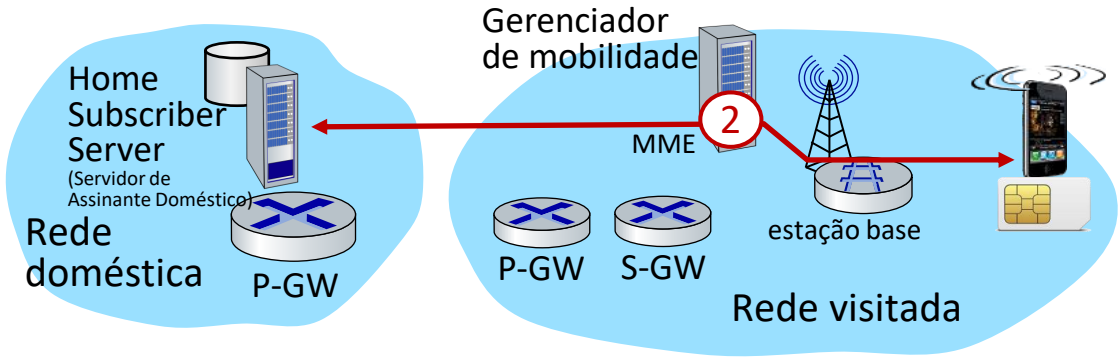
③ configuração do plano de dados:

- MME configura túneis de encaminhamento para o dispositivo móvel
- redes doméstica e visitada estabelecem túneis do P-GW doméstico para o dispositivo móvel

④ *handover* do dispositivo móvel:

- o dispositivo móvel altera seu ponto de conexão para o da rede visitada

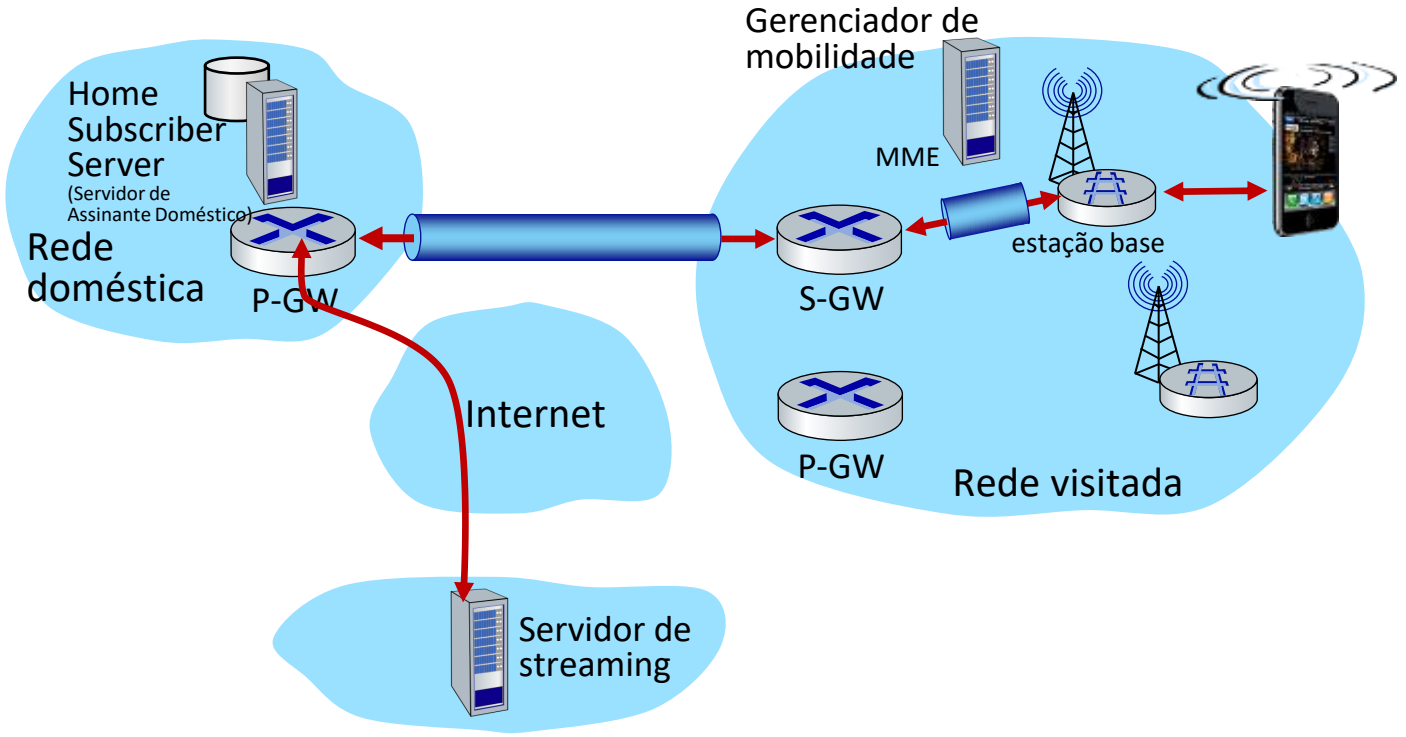
Configurando elementos do plano de controle do LTE



- O dispositivo móvel se comunica com o MME local pelo canal de plano de controle da estação base
- O MME usa as informações IMSI do dispositivo móvel para entrar em contato com o seu HSS doméstico
  - recuperar informações de autenticação, criptografia e serviço de rede
  - O HHS doméstico sabe que o dispositivo móvel agora está em uma rede visitada
- Estação base e dispositivo móvel selecionam parâmetros para o canal de radio do plano de dados entre a estação e o dispositivo

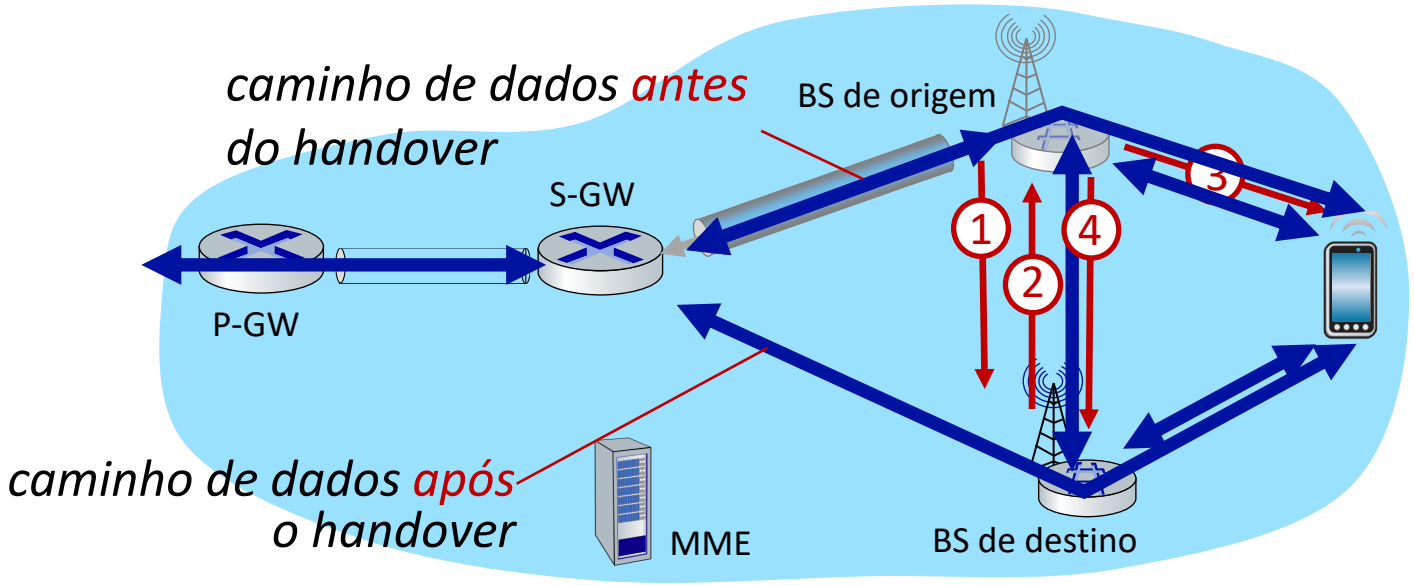
Configurando túneis de plano de dados para dispositivos móveis

- túnel S-GW para estação base: quando o dispositivo móvel muda de estação base, simplesmente mude o endereço IP do endpoint do túnel
- túnel S-GW para P-GW doméstico: implementação de roteamento indireto



- tunelamento via GTP (GPRS tunneling protocol): datagrama do dispositivo móvel para servidor de streaming encapsulado usando GTP dentro do UDP, dentro do datagrama

Handover entre BSs na mesma rede celular



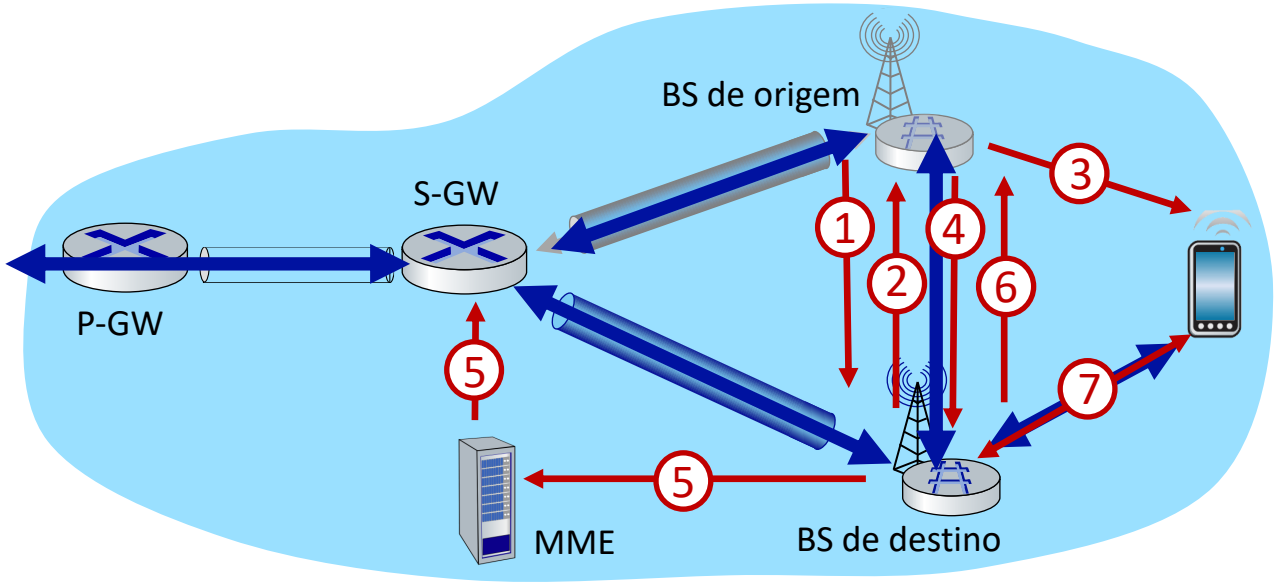
1. BS atual (origem) seleciona BS de destino e envia *Handover Request message*

2. BS de destino pré-aloca intervalos de tempo de rádio, responde com HR ACK com informações para dispositivo móvel

3. BS de origem informa dispositivo móvel sobre novo BS
   - o dispositivo móvel agora pode enviar pelo novo BS - a transferência *parece* completa para o dispositivo móvel

4. a BS de origem para de enviar datagramas para o dispositivo móvel, ao invés disso, encaminha para a nova BS (que encaminha para o dispositivo móvel pelo canal de rádio)

Handover entre BSs na mesma rede celular



5 BS de destino informa ao MME que é novo BS para o dispositivo móvel

- MME instrui S-GW a alterar o ponto final do túnel para ser o (novo) BS de destino

6 BS de destino envia ACK de volta para a BS de origem: *handover* concluído, o BS de origem pode liberar recursos

7 os datagramas do dispositivo móvel agora fluem através do novo túnel do BS de destino para o S-GW

IP móvel

- arquitetura IP móvel padronizada ~ 20 anos atrás [RFC 5944]
  - muito antes dos smartphones onipresentes e do suporte do 4G para protocolos de Internet
  - não viu ampla implantação/uso
  - talvez WiFi para Internet e telefones 2G/3G para voz fossem “bons o suficiente” na época
- arquitetura IP móvel:
  - roteamento indireto para nó (via rede doméstica) usando túneis
  - agente doméstico de IP móvel: papéis combinados de HSS 4G e P-GW doméstico
  - agente estrangeiro de IP móvel: papéis combinados de MME 4G e S-GW
  - protocolos para descoberta de agentes na rede visitada e registro do local visitado na rede doméstica via extensões do ICMP

Sem fio, mobilidade: impacto em protocolos de camada superior

- logicamente, o impacto *deve* ser mínimo …
  - modelo de serviço de melhor esforço permanece inalterado
  - TCP e UDP podem executar (e executam) em redes sem fio e redes móveis
- … mas em termos de desempenho:
  - perda/atraso de pacotes devido a erros de bit (pacotes descartados, atrasos para retransmissões da camada de enlace) e perdas por transferência (*handover*)
  - o TCP interpreta a perda como congestionamento e diminuirá a janela de congestionamento desnecessariamente
  - deficiências causadas por atraso para tráfego em tempo real
  - largura de banda é um recurso escasso para enlaces sem fio

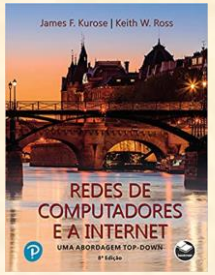
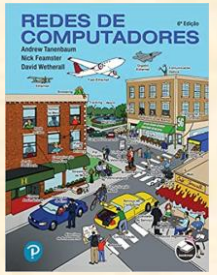
Capítulo 7: resumo

Sem Fio

- Enlaces Sem Fio e características de rede
- WiFi: LANs sem fio 802.11
- Redes Celulares: 4G e 5G

Mobilidade

- Gestão da mobilidade: princípios
- Gestão da mobilidade: prática
  - Redes 4G/5G
  - IP Móvel
- Mobilidade: impacto em protocolos de camadas superiores

Leitura Recomendada e Complementar

- Leitura Recomendada:
  - KUROSE, James F. e ROSS, Keith W. Redes de computadores e a Internet: Uma abordagem top-down. 8ª Edição. Bookman, 2021.
    - Capítulo 7 – Redes Sem Fio e Redes Móveis.
  - TANENBAUM, Andrew S., FEAMSTER, Nick e WETHERALL, David. Redes de Computadores. 6ª Edição. São Paulo: Bookman, 2021.
    - Capítulo 3 – A Camada de Enlace de Dados.
    - Capítulo 4 – A Subcamada de Controle de Acesso ao Meio.
- Leitura Complementar:
  - FOUROUZAN, Behrouz A. e FIROUZ, Mosharraf. Redes de Computadores: uma abordagem top-down. Porto Alegre: AMGH, 2013.
    - Capítulo 6 – Redes sem Fio e IP Móvel.
  - TORRES, Gabriel. Redes de Computadores: Curso Completo. Axcel Books, 2001.
    - Capítulo 12 – Redes Sem Fio.
  - COMER, Douglas E. Interligação de Redes com TCP/IP. Volume 1: Princípios, protocolos e arquitetura. 6ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
    - Capítulo 2 – Revisão das tecnologias de rede básicas.
  - MAIA, Luiz Paulo. *Arquitetura de Redes de Computadores.* 2ª edição. LTC, 2013.
    - Capítulos 4 e 5.