

**Aulas 8 e 9**

# **Redes Sem-Fio e Mobilidade**

**O padrão IEEE 802.11**

Igor Monteiro Moraes  
Redes de Computadores II

# ATENÇÃO!

- Esta apresentação contém partes baseadas nos seguintes trabalhos
  - Notas de aula do Prof. Marcelo Rubinstein, disponíveis em <http://www.lee.eng.uerj.br/~rubi>
  - Notas de aula do Prof. José Augusto Suruagy Monteiro, disponíveis em <http://www.nuperc.unifacs.br/Members/jose.suruagy/cursos>
  - Material complementar do livro Computer Networking: A Top Down Approach, 5th edition, Jim Kurose and Keith Ross, Addison-Wesley, abril de 2009
  - Computer Networks, Andrew S. Tanenbaum, 4a. Edição, Editora Prentice Hall
  - Redes e Sistemas de Comunicação de Dados, William Stallings, 1ª. Edição, Campus, 2005.

# Padrão IEEE 802.11

- Criação de vários tipos de redes sem-fio
  - Interconectar computadores portáteis sem utilizar fios
    - Mobilidade
- Para evitar a incompatibilidade entre essas redes
  - IEEE criou o padrão 802.11
- Tecnologia de rede de maior êxito comercial depois da Ethernet
- Conhecido como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*)
  - Nome comercial

# Padrão IEEE 802.11

- Mais de uma dezena de extensões
  - Diferentes camadas físicas
  - Qualidade de serviço
  - *Handoff*
  - Segurança
  - Entre outros

# Padrão IEEE 802.11

- Diferentes camadas físicas (até 2013)

<b>LLC</b>	Camada LLC 802.2						
<b>MAC</b>	CSMA/CA						
<b>PHY</b>	802.11 2 Mb/s ISM (2,4 GHz)	802.11b 11 Mb/s ISM (2,4 GHz)	802.11a 54 Mb/s ISM (5,8 GHz)	802.11g 54 Mb/s ISM (2,4 GHz)	802.11n 600 Mb/s ISM (2,4 ou 5,8 GHz)	802.11ac 1 Gb/s ISM (5,8 GHz)	802.11ad 7 Gb/s ISM (2,4, 5,8 ou 61,2 GHz)

- Camada Física (PHY)
  - Geração/remoção de parâmetros (preâmbulo) para sincronização
  - Recepção e transmissão de bits
  - Especificação do meio de transmissão
  - Definição de padrões de transmissão e codificação de sinais
    - FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrun*)
    - DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*)
    - OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

- Camada Física (PHY)
  - Geração/remoção de parâmetros (preâmbulo) para sincronização
  - Recepção e transmissão de bits
  - Especificação do meio de transmissão
  - Definição de padrões de transmissão e codificação de sinais
    - FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrun*)
    - DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*)
    - OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

**Mais detalhes a seguir...**

# Padrão IEEE 802.11

- Extensões para as diferentes camadas físicas
- 802.11 “puro” (1997)
  - Até 2 Mb/s
  - Infravermelho
  - 2,4 GHz → banda não-licenciada ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*)
    - FHSS ou DSSS

# Padrão IEEE 802.11

- 802.11b (1999)
  - Até 11 Mb/s
  - ISM, 2,4 GHz
    - DSSS ou CCK (*Complementary Code Keying*)
- 802.11a (1999)
  - Até 54 Mb/s
  - ISM, 5,8 GHz
    - OFDM

# Padrão IEEE 802.11

- 802.11g (2003)
  - Até 54 Mb/s
  - ISM, 2,4 GHz
    - DSSS, CCK ou OFDM
  
- 802.11n (2009)
  - Até 600 Mb/s
  - ISM, 2,4 ou 5,8 GHz
    - DSSS, CCK ou OFDM
  - Múltiplas antenas
    - MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)

# Padrão IEEE 802.11

- 802.11ac (2013)
  - Até 1 Gb/s
  - Múltiplas antenas: MIMO
  - ISM, 5,8 GHz
    - OFDM
    - Até 256-QAM

# Padrão IEEE 802.11

- 802.11ad (2012)
  - Chamado de WiGig
  - Até 7 Gb/s
  - ISM, 2,4; 5,8 ou 60 GHz
    - OFDM
    - Até 64-QAM
- “WiGig Docking: The First Step to an “All-Wireless Everything””
  - <http://blogs.intel.com/technology/2014/07/wigig-docking-first-step-wireless-everything/>

# Padrão IEEE 802.11

	<b>802.11a</b>	<b>802.11b</b>	<b>802.11g</b>	<b>802.11 n</b>
<b>Data de aprovação</b>	07/1999	07/1999	06/2003	10/2009
<b>Taxa máxima (Mb/s)</b>	54	11	54	600
<b>Banda de operação (GHz)</b>	5,8	2,4	2,4	2,4 ou 5,8
<b>Modulação</b>	OFDM	DSSS, CCK	DSSS, CCK, OFDM	DSSS, CCK, OFDM
<b>Largura do canal (MHz)</b>	20	20	20	20 ou 40

# Padrão IEEE 802.11

	<b>802.11ac</b>	<b>802.11ad</b>
<b>Data de aprovação</b>	2013	2012
<b>Taxa máxima (Mb/s)</b>	1000	7000
<b>Banda de operação (GHz)</b>	5,8	2,4; 5,8 ou 60
<b>Modulação</b>	OFDM	OFDM
<b>Largura do canal (MHz)</b>	80 ou 160	2000

# Padrão IEEE 802.11

Todos os padrões usam o **CSMA/CA** e podem operar nos modos **infraestruturado** e *ad hoc*

# Padrão IEEE 802.11

- Outras propostas recentes
  - 802.11af (2013)
    - Transmissão de dados nos espaços em branco do espectro de TV
    - White-Fi

# Padrão IEEE 802.11

- Mais extensões
  - 802.11e – Qualidade de serviço
  - 802.11f – *Handoff*
  - 802.11h – Controle de potência
  - 802.11i – Autenticação e encriptação
  - 802.11j – Interoperabilidade
  - 802.11k – Monitoramento
  - 802.11p – Redes veiculares
  - 802.11s – Redes em malha
  - Entre outros

# Arquitetura

# Arquitetura do IEEE 802.11

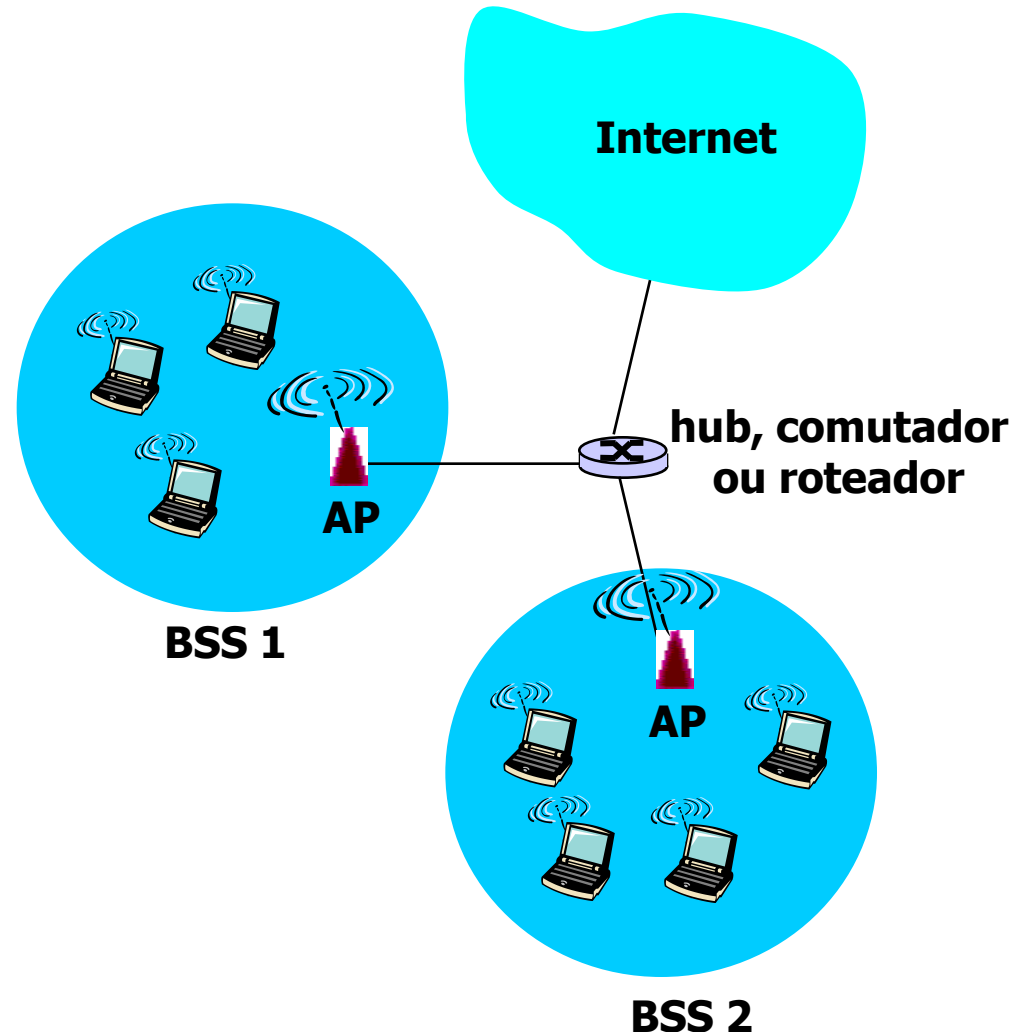
- Componentes que interagem para prover uma rede local transparente para as camadas superiores
- Conjunto básico de serviços (BSS – *Basic Service Set*)
  - Bloco fundamental de construção da arquitetura
  - Grupo de estações sob uma mesma função de coordenação
    - Função determina quando uma estação pode transmitir e receber dados
- Dois modos
  - Infraestruturado
  - *Ad hoc*

# Modo Infraestruturado

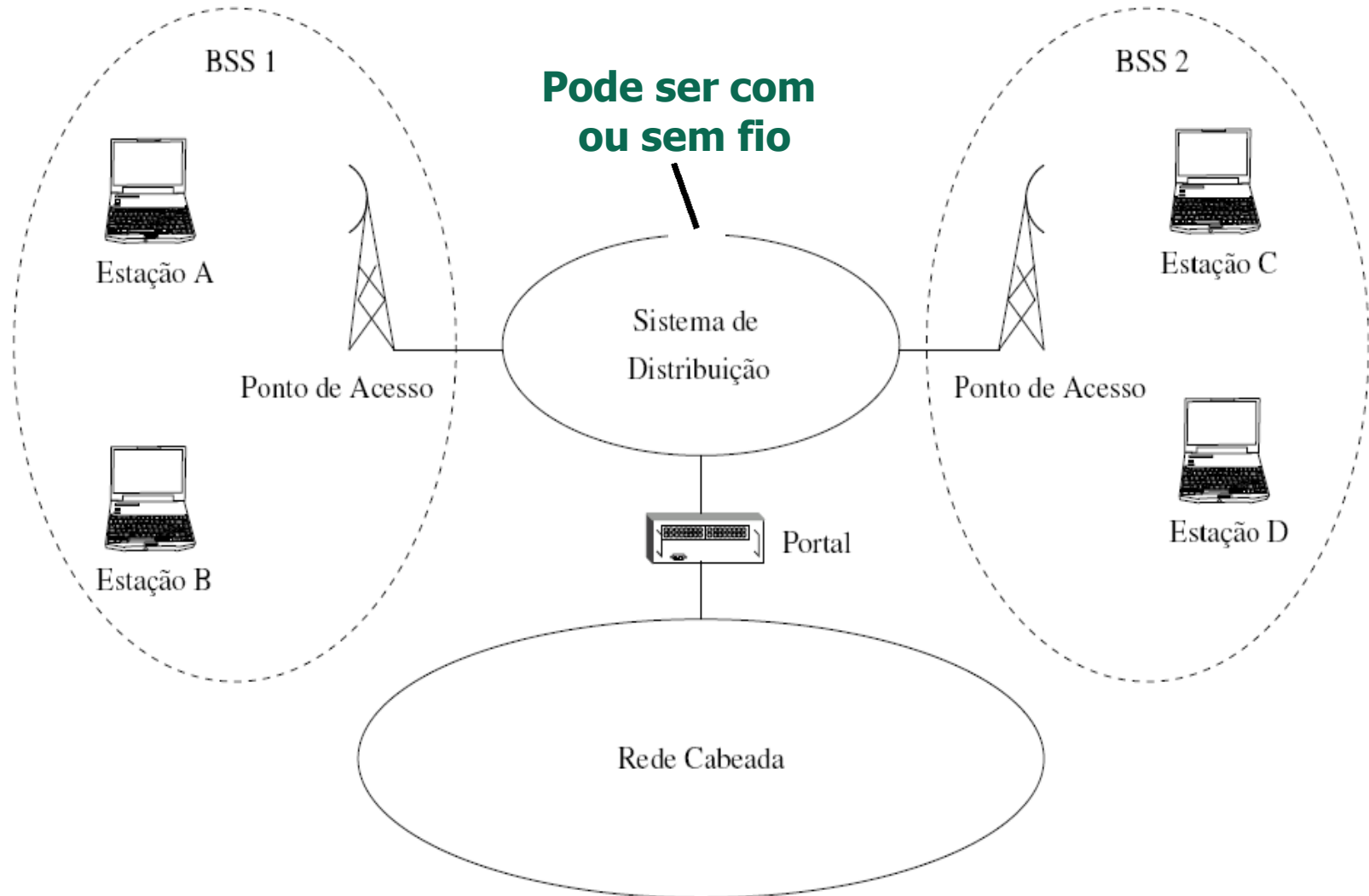
- Comunicação passa por um ponto de acesso
- Vários pontos de acesso podem ser interligados através de um *backbone*
  - Sistema de distribuição
    - Pode ser sem-fio (WDS – *Wireless Distribution System*)
- Conjunto das estações e do sistema de distribuição formam um ESS (*Extended Service Set*)
  - Parece ser uma única rede para as camadas superiores

# Modo Infraestruturado

- Estações sem-fio se comunicam com a estação-base
  - Estação-base = ponto de acesso (AP)
- Conjunto básico de serviços (BSS)
  - Sinônimo de célula
- No modo infraestruturado, um BSS contém
  - Estações sem-fio e APS



# Modo Infraestruturado



# Modo *Ad Hoc*

- Não usa ponto de acesso
- BSS independente (IBSS)

**IBSS**



## Múltiplos saltos

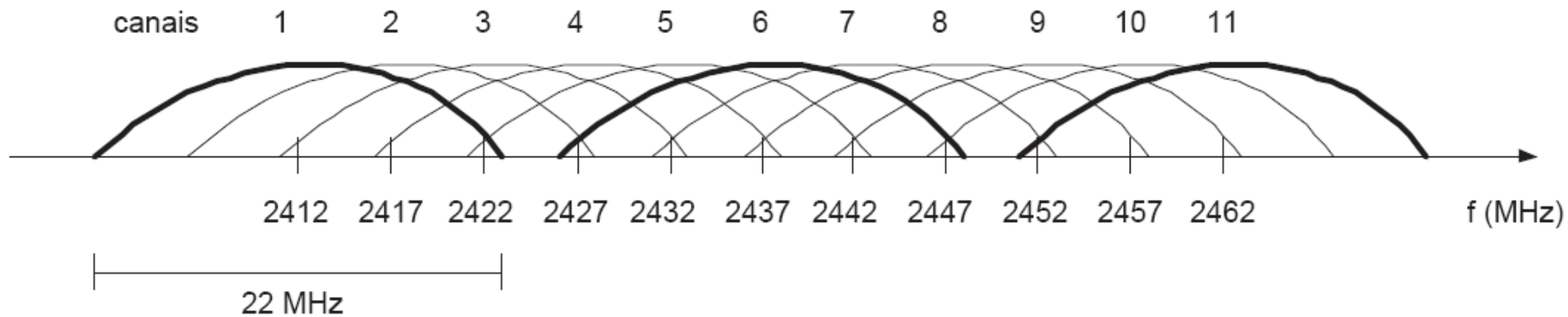
**IBSS**

# Gerenciamento

- Escaneamento
- Autenticação
- Associação
- Outros

- Encontrar redes na vizinhança de um nó
- Dois tipos
  - Passiva: muda para cada canal na lista e espera por quadros de sinalização (*beacon*)
  - Ativa: transmite *probe requests*

- Espectro de 2,4 a 2,485 GHz é dividido em 11 canais
  - Usado pelo IEEE 802.11b e g
  - Canais com partes superpostas com canais vizinhos



- A busca utiliza alguns parâmetros
  - Tipo de BSS: independente, infraestruturado ou ambos
  - BSSID (endereço MAC do AP): individual (busca por uma rede específica) ou difusão (busca por qualquer rede)
  - SSID: individual ou difusão
    - É um identificador da rede
  - Lista de canais
    - Pode ser uma lista de canais (DSSS) ou um padrão de saltos (FHSS)
  - Outros

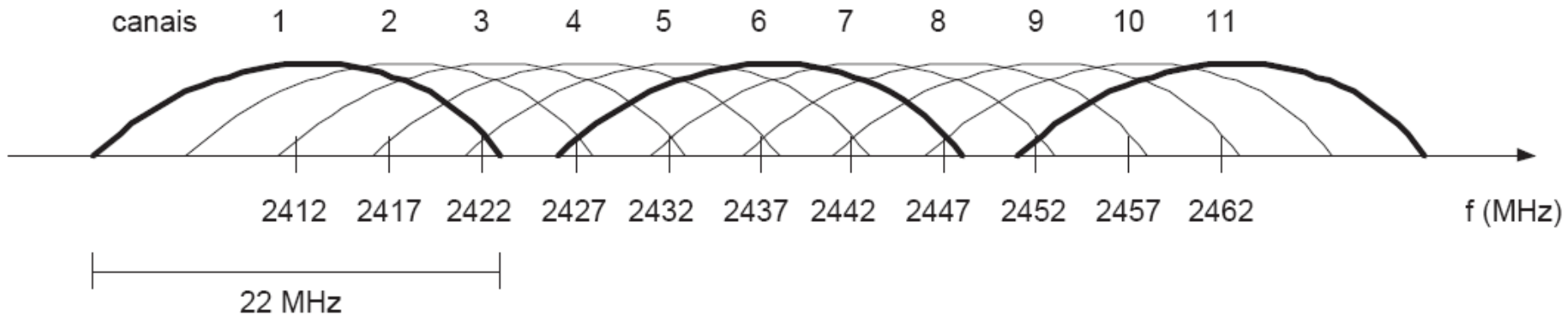
# Autenticação

- Autenticação de “baixo nível”
- Estação apresenta sua identidade (endereço MAC) antes de enviar quadros
- Rede infraestruturada
  - Autenticação da estação e não do ponto de acesso

- Dois tipos
  - De sistema aberto (*open system authentication*)
    - Simples troca de quadros com as identidades
  - De chave compartilhada (*shared key authentication*)
    - Usa o WEP (*Wired Equivalent Privacy*)
    - Desafio (texto em claro) é enviado ao cliente e a resposta (texto cifrado) prova que o cliente possui a chave
    - Atualmente, existem mais alternativas
- Também pode ser usada lista de acesso
  - Filtragem de endereços MAC

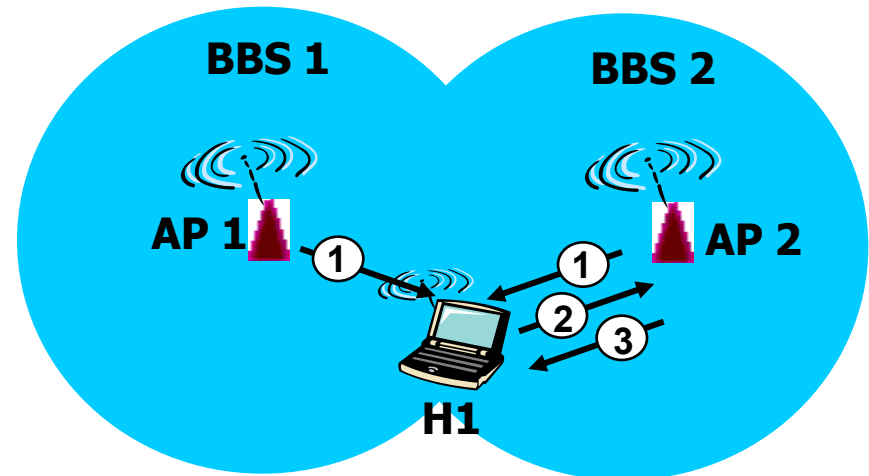
- Só é necessária para redes infraestruturadas
  - Escolha de canal, atribuição de endereços etc.
  - É necessária para enviar e receber quadros
- Permite que o sistema de distribuição localize cada estação
  - APs podem repassar as informações da associação para outros APs dentro do mesmo ESS

- Administrador escolhe um canal para o AP
  - Possibilidade de interferência se APs vizinhos usam o mesmo canal
  - Algoritmo de seleção não é definido pelo padrão



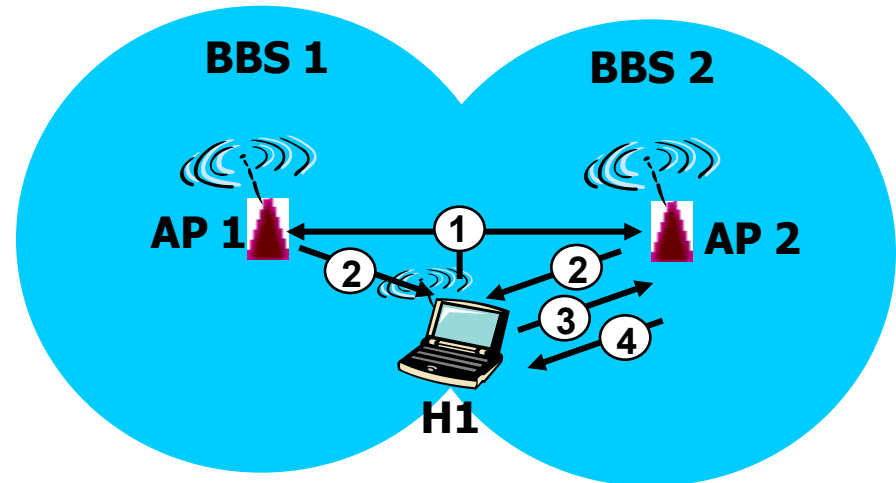
- Estação se associa a um AP
  - Varre os 11 canais em busca de quadros de sinalização (*beacon*) → varredura
    - *Beacon* inclui o SSID (*Service Set Identifier*) e o MAC do AP
      - Enviados periodicamente pelos APs para indicar que estão ativos
  - Escolhe um AP para se associar
  - Se autentica, se necessário, e faz a associação
  - Geralmente usa DHCP para obter um endereço da sub-rede do AP

- Escaneamento passivo
  1. Quadro de *beacon* são enviados pelos APs
  2. Quadro de requisição de associação é enviado por H1 para o AP selecionado
  3. Quadro de resposta de associação é enviado pelo AP selecionado para H1



# Associação

- Escaneamento ativo
  1. Sondas são enviadas por H1 em difusão
  2. APs enviam respostas às sondas para H1
  3. Quadro de requisição de associação é enviado por H1 para o AP selecionado
  4. Quadro de resposta de associação é enviado pelo AP selecionado para H1



# Camada MAC

# IEEE 802.11: Camada MAC

- Acesso múltiplo
  - Estações podem querer transmitir seus quadros no mesmo instante em um mesmo canal
    - Tanto estações associadas aos APs quanto em uma rede *ad hoc*

# IEEE 802.11: Camada MAC

- Acesso múltiplo
  - Estações podem querer transmitir seus quadros no mesmo instante em um mesmo canal
    - Tanto estações associadas aos APs quanto em uma rede *ad hoc*

**Como coordená-las?**

# IEEE 802.11: Camada MAC

- Acesso múltiplo
  - Estações podem querer transmitir seus quadros no mesmo instante em um mesmo canal
    - Tanto estações associadas aos APs quanto em uma rede *ad hoc*

## Como coordená-las?

- Usar o CSMA/CD?
  - Eficiente para o Ethernet

# IEEE 802.11: Camada MAC

- Acesso múltiplo
  - Estações podem querer transmitir seus quadros no mesmo instante em um mesmo canal
    - Tanto estações associadas aos APs quanto em uma rede *ad hoc*

## Como coordená-las?

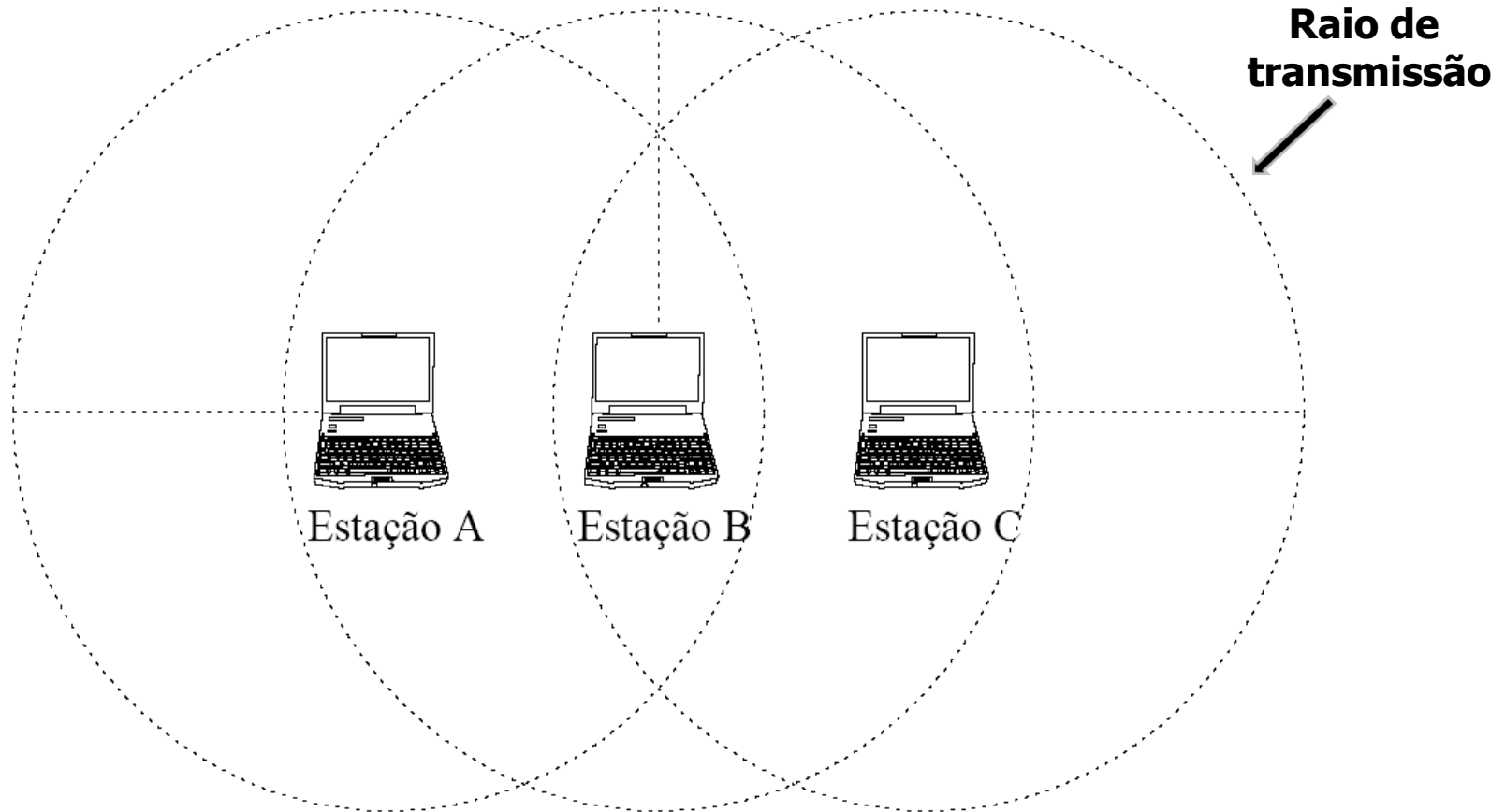
- Usar o CSMA/CD?
  - Eficiente para o Ethernet

**O que é necessário para se detectar colisões na comunicação sem fio?**

# IEEE 802.11: Camada MAC

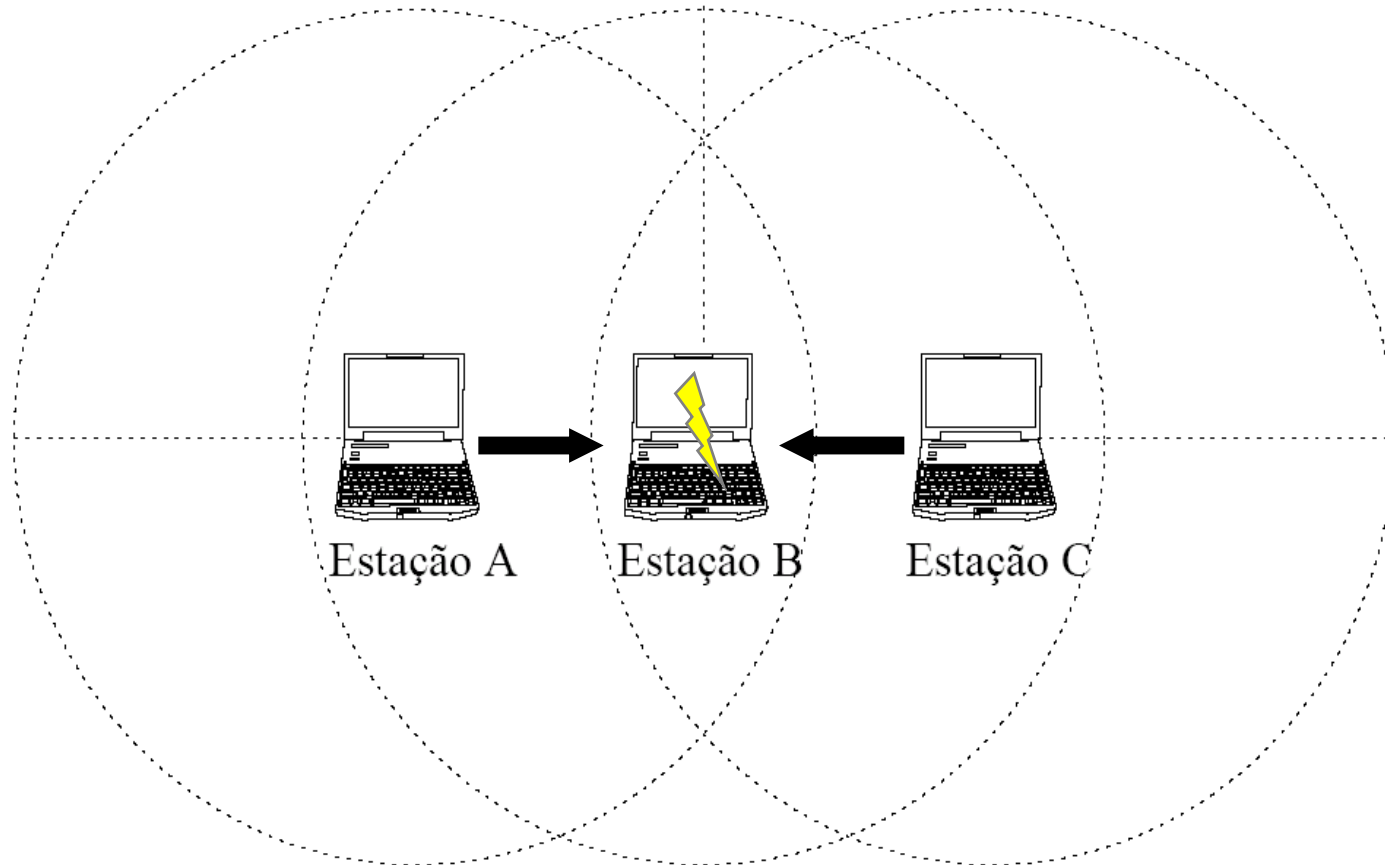
- Para detectar colisões
  - É necessário enviar e receber um sinal ao mesmo tempo
    - Potência do sinal transmitido  $\gg$  potência do sinal recebido
    - Alto custo para desenvolver um hardware capaz de detectar uma colisão nesse cenário
- Mesmo com uma interface de rede capaz de transmitir e receber ao mesmo tempo
  - É possível que existam colisões?

# Terminal Escondido



**A e C querem transmitir para B num dado instante**

# Terminal Escondido



**Colisão em B, sem que A e C saibam**

# IEEE 802.11: Camada MAC

- Para detectar colisões
  - É necessário enviar e receber um sinal ao mesmo tempo
    - Potência do sinal transmitido  $\gg$  potência do sinal recebido
    - Alto custo para desenvolver um hardware capaz de detectar uma colisão nesse cenário
- Mesmo com uma interface de rede capaz de transmitir e receber ao mesmo tempo
  - É possível que existam colisões? **Sim!**
    - Em virtude do problema do **terminal escondido**

# IEEE 802.11: Camada MAC

- Para detectar colisões
  - É necessário enviar e receber um sinal ao mesmo tempo
    - Potência do sinal transmitido  $\gg$  potência do sinal recebido
    - Alto custo para desenvolver um hardware para detectar a colisão nesse cenário
- **O IEEE 802.11 usa o CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)**
  - Detectam colisões? **Sim!**
  - Em virtude do problema do **terminal escondido**

# IEEE 802.11: Camada MAC

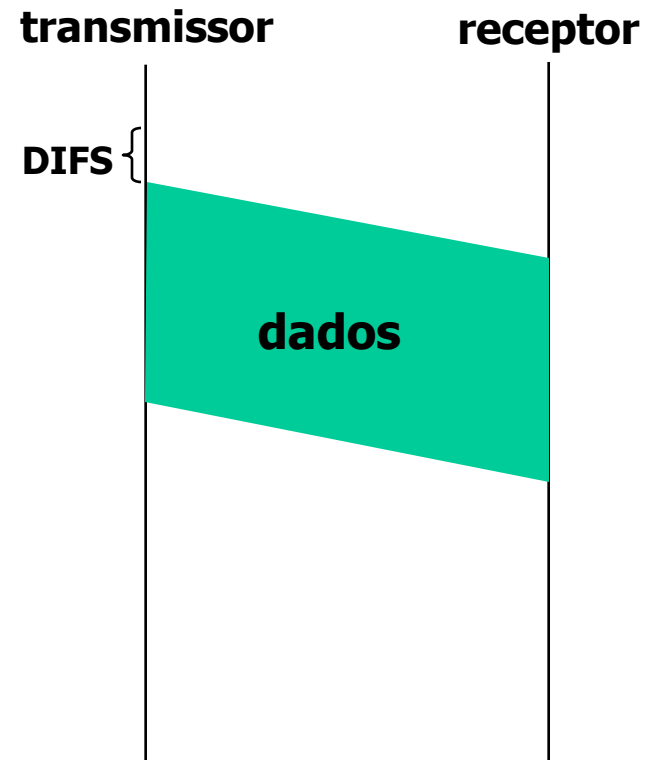
- Dois mecanismos de acesso ao meio
  - DCF (*Distributed Coordination Function*)
    - Distribuído
  - PCF (*Point Coordination Function*)
    - Centralizado
    - Opcional e pouco implementado
- DCF
  - Modo básico
    - Usa CSMA/CA
  - Modo com RTS/CTS
    - CSMA/CA com RTS/CTS

# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- Escuta de portadora
  - Durante um tempo chamado intervalo entre quadros
  - Quanto menor o intervalo maior a prioridade
    - **DIFS** (*Distributed InterFrame Space*)
      - Para quadros de **dados**
    - **SIFS** (*Short InterFrame Space*)
      - Para quadros de **ACK**

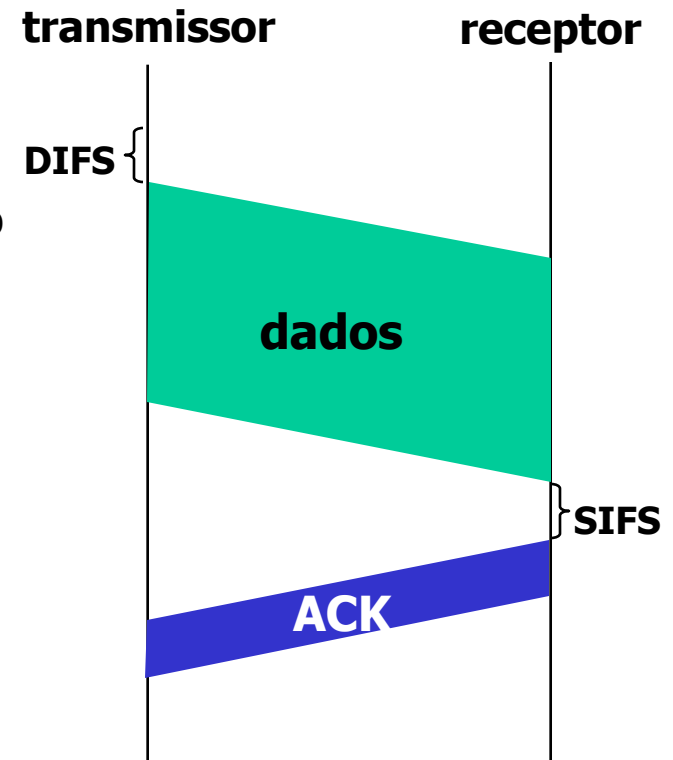
# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- Transmissor
  1. Se escuta o meio livre por DIFS, então
    - Transmite todo o quadro
      - Sem detecção de colisão
  2. Se escuta o meio e ele está ocupado, então
    1. Inicia o *backoff*
    2. Temporizador é decrementado enquanto o meio está livre
    3. Transmite quando o temporizador expira
    4. Se não recebe o ACK, aumenta a janela de contenção (CW) e repete o Passo 2

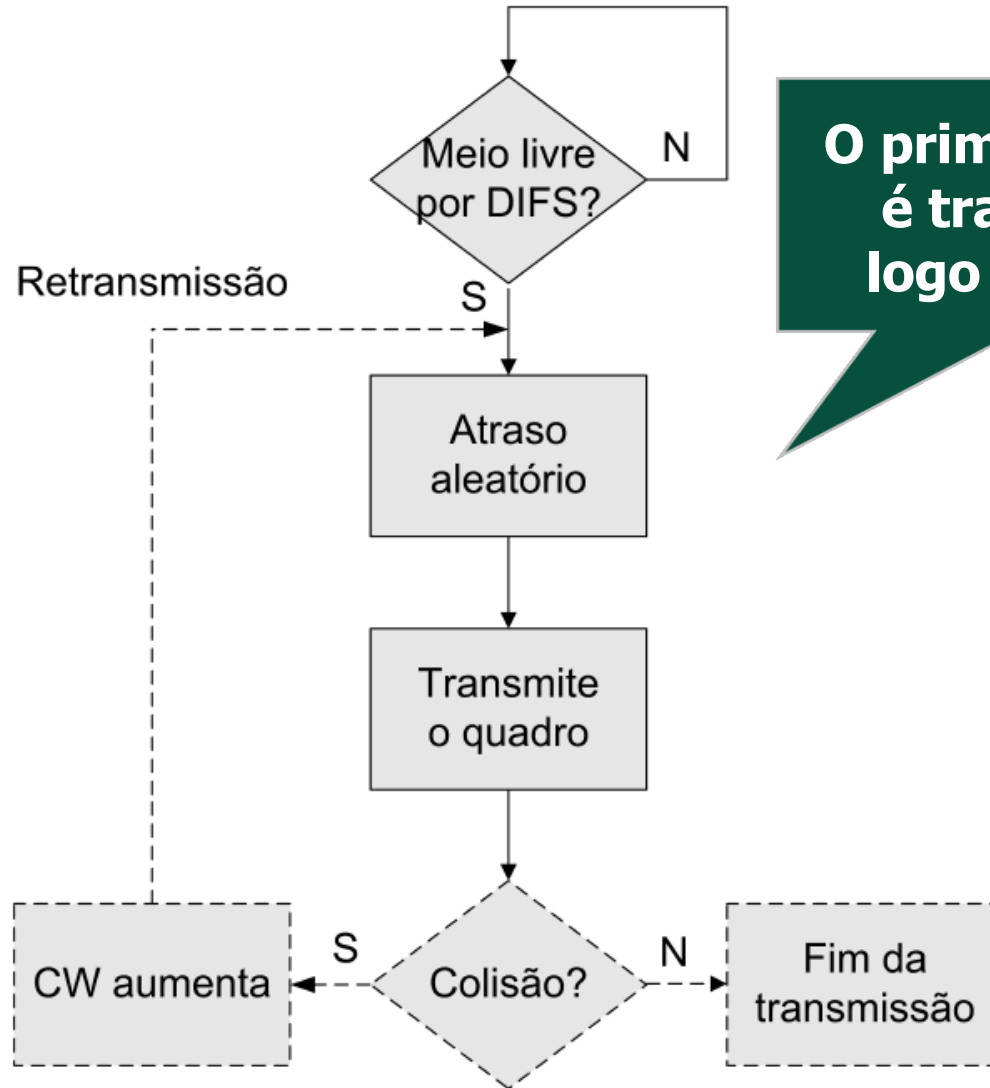


# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- Receptor
  1. Se o quadro é recebido sem erros
    - Envia um ACK após SIFS
      - Necessário devido às altas taxas de erro do canal sem-fio e ao problema do terminal escondido



# Lógica de transmissão do IEEE 802.11 (após o primeiro quadro)



**O primeiro quadro é transmitido logo após DIFS**

# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- Para evitar colisões
  - Tempo aleatório (*backoff*) entre transmissões sucessivas de quadros
    - Menor probabilidade de duas ou mais estações transmitirem simultaneamente
  - Evitar também a captura do meio
- Mecanismos de envio de reconhecimentos positivos (ACKs)
  - Devido às altas taxas de erro do meio sem-fio
  - Informa que o quadro foi recebido corretamente
    - Recuperação de erros → retransmissão

# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- Para evitar colisões
  - Tempo aleatório (*backoff*) entre transmissões sucessivas de quadros
    - Menor probabilidade de duas ou mais estações transmitirem simultaneamente
  - Evitar também a colisão

**Diferenças para o CSMA/CD**

- Mecanismos de envio de reconhecimentos positivos (ACKs)
  - Devido às altas taxas de erro do meio sem-fio
  - Informa que o quadro foi recebido corretamente
    - Recuperação de erros → retransmissão

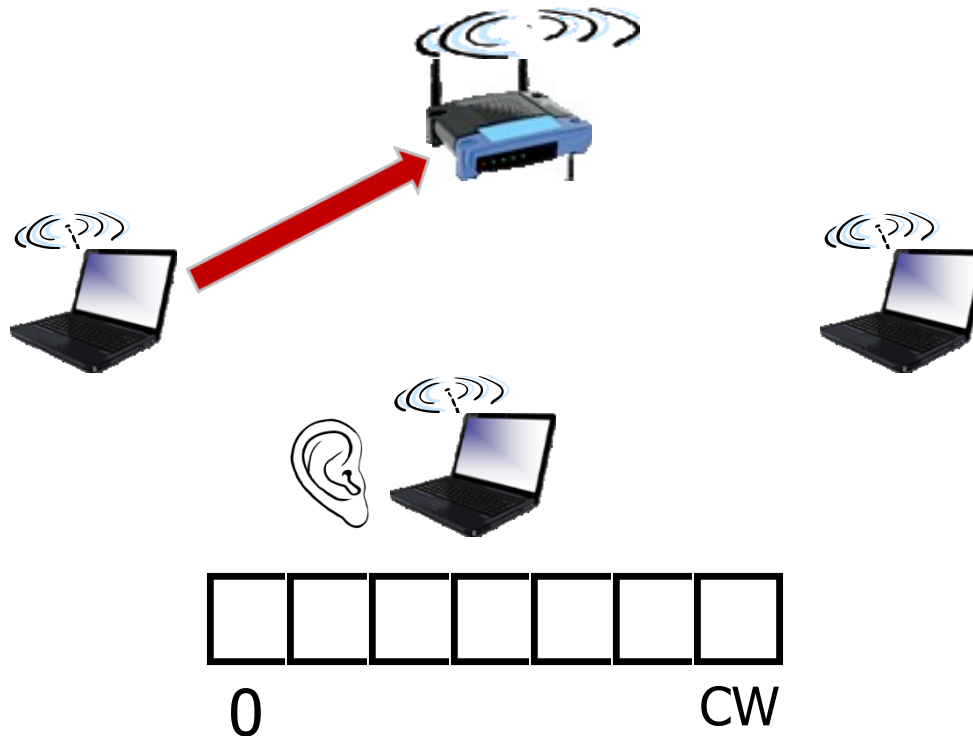
- Temporizador de *backoff* → número aleatório de *slots* entre 0 e CW

$$backoff = random(CW) \times SlotTime$$

- O temporizador só começa a ser decrementado após a estação escutar o meio livre por DIFS
- Decrementa-se o temporizador a cada tempo de *slot*, caso o meio esteja livre
  - Tempo de *slot* = atraso máximo de propagação dentro de um BSS + outros atrasos
  - Temporizador para quando há alguma transmissão
  - Quando o temporizador chega a zero → transmite o quadro

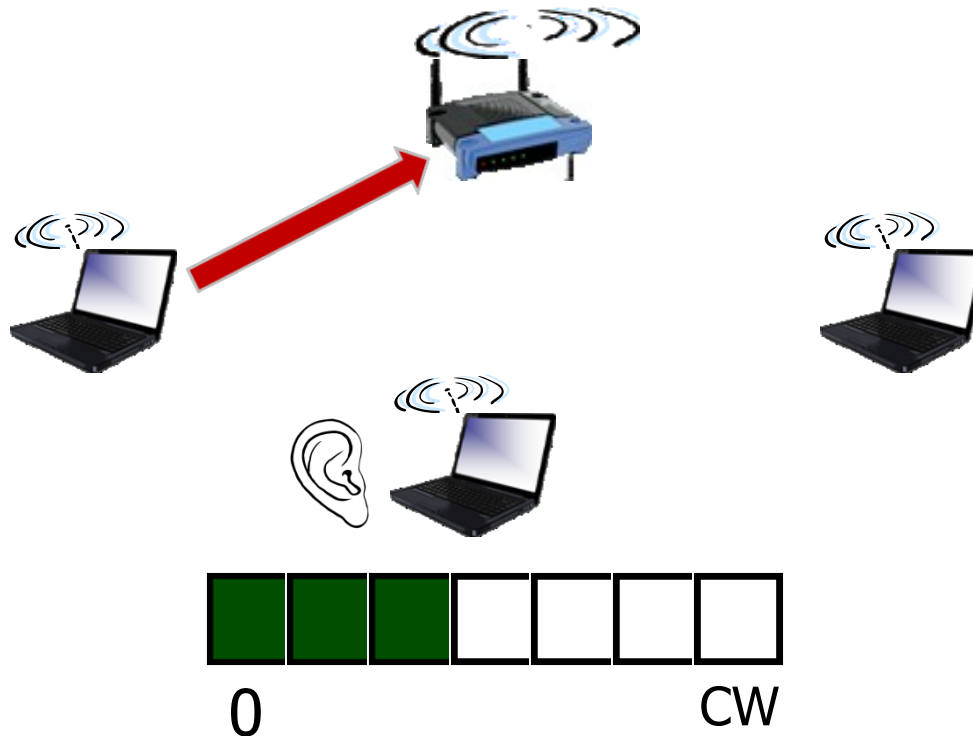
# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *Backoff*
  - Estação deseja enviar, mas encontra o meio ocupado



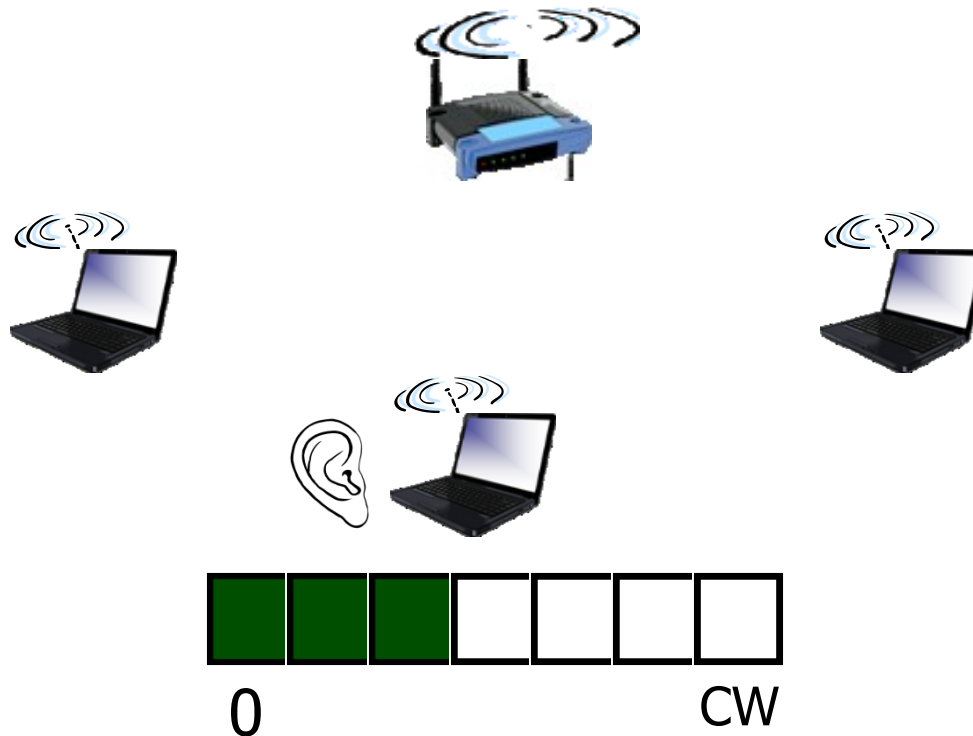
# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *Backoff*
  - Escolhe-se um número aleatório de *slots* entre 0 e CW associado a um temporizador de *backoff*



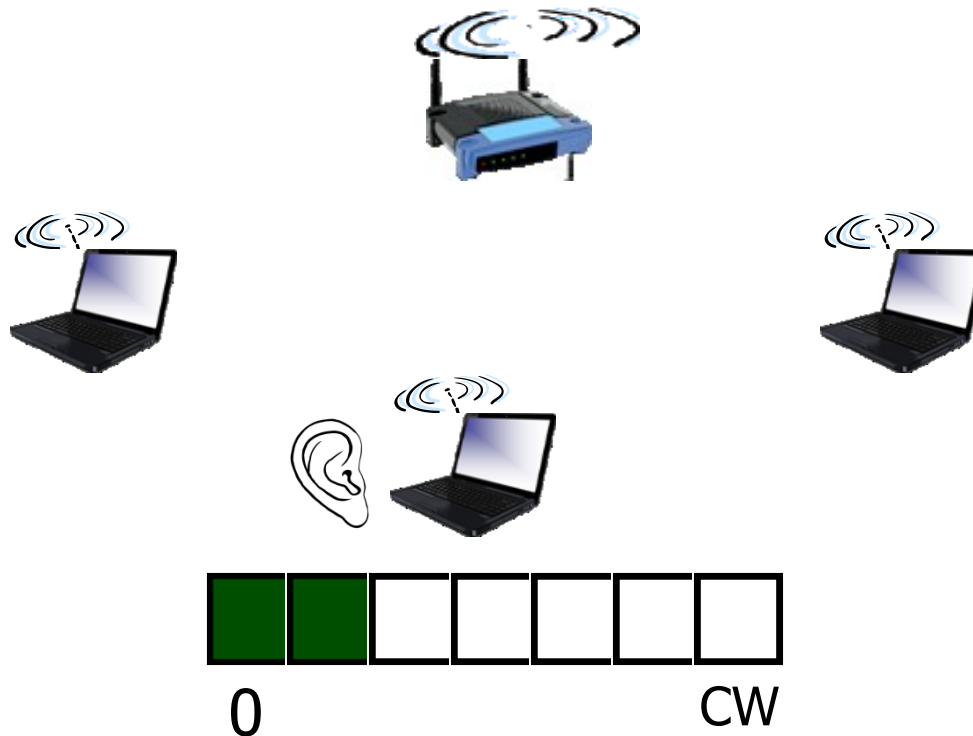
# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *Backoff*
  - Meio livre por mais de DIFS, decrementa-se o temporizador a cada tempo de *slot*



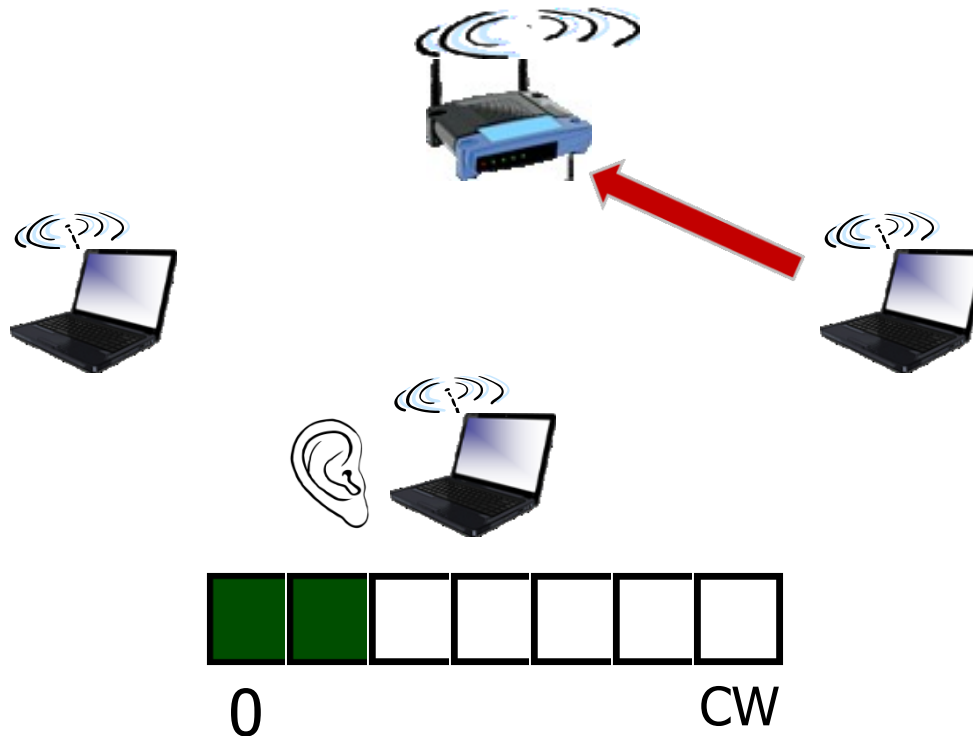
# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *Backoff*
  - Meio livre por mais de DIFS, decrementa-se o temporizador a cada tempo de *slot*



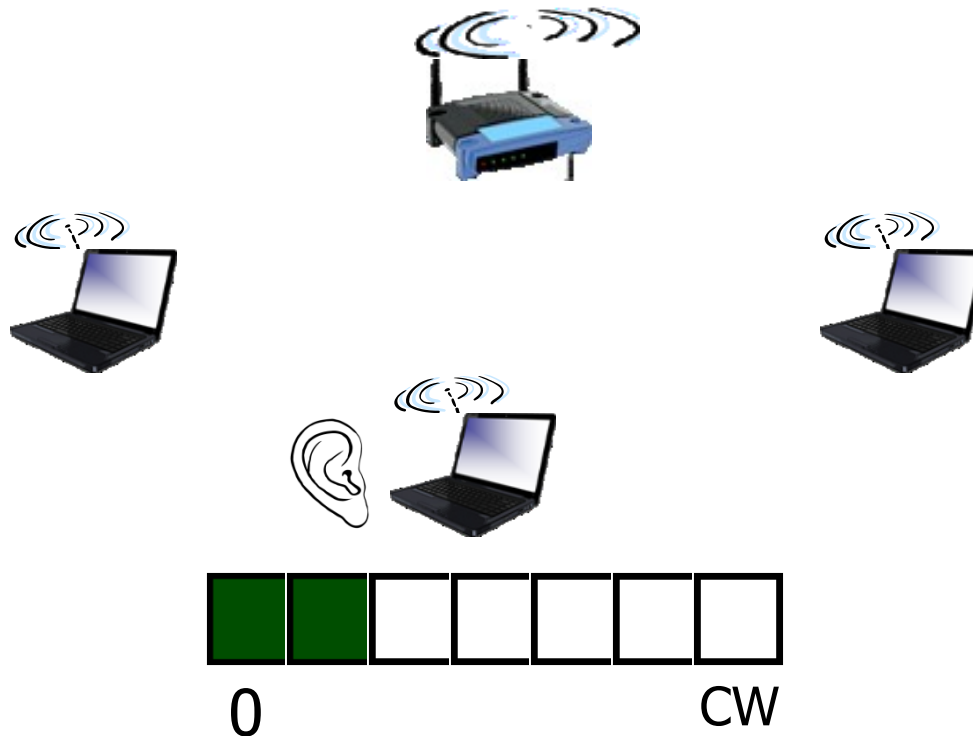
# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *Backoff*
  - Temporizador não é decrementado caso haja uma transmissão



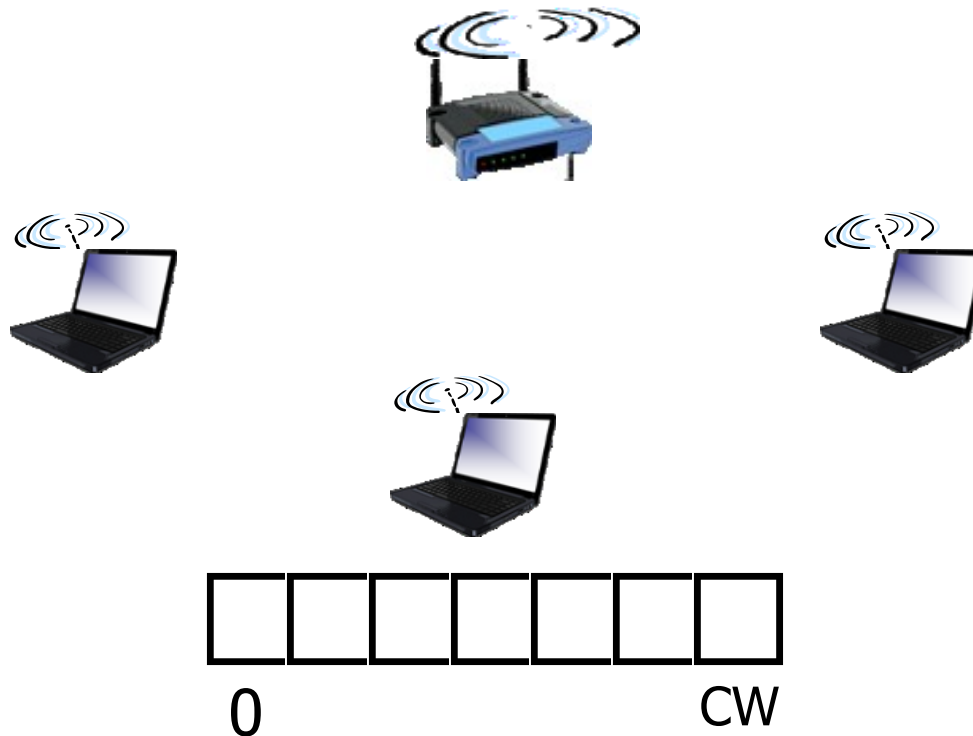
# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *Backoff*
  - Após o canal ficar ocioso por mais de DIFS, decrementa-se novamente o temporizador até chegar a zero



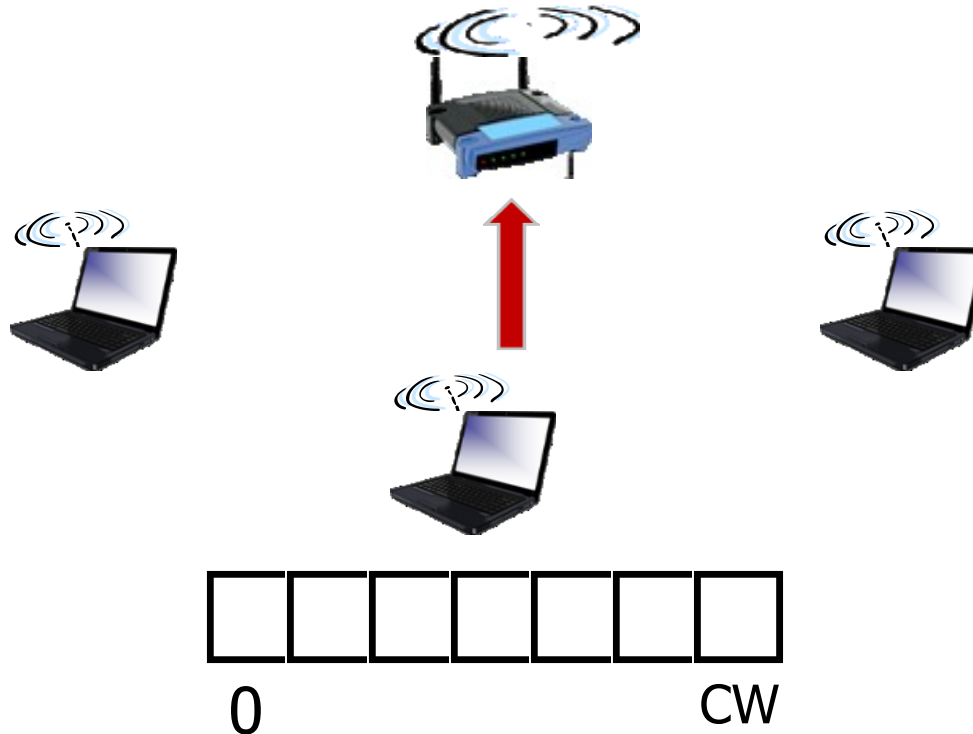
# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *Backoff*
  - Após o canal ficar ocioso por mais de DIFS, decrementa-se novamente o temporizador até chegar a zero



# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *Backoff*
  - Estação transmite



# Janela de Contenção

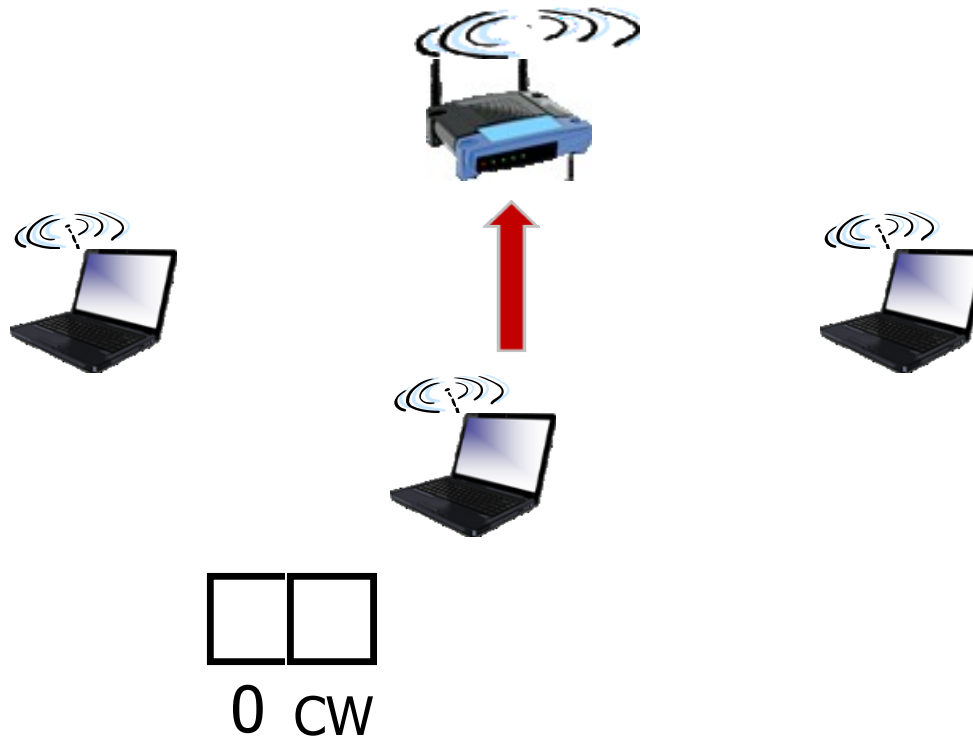
- *CW (Contention Window)*
  - Aumenta quando uma colisão é inferida
    - A janela é dobrada, caso um ACK não seja recebido em um determinado tempo
      - Próxima potência de 2 menos 1, até  $CW_{max}$

$$CW = ((CW_{min} + 1) * 2^{i-1}) - 1$$

- $CW_{min}$  e  $CW_{max}$  dependem da camada física
- Quadro é descartado após um número máximo de tentativas de transmissão

# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *CW (Contention Window)*
  - Estação transmite e espera um ACK



# DCF Modo Básico: CSMA/CA

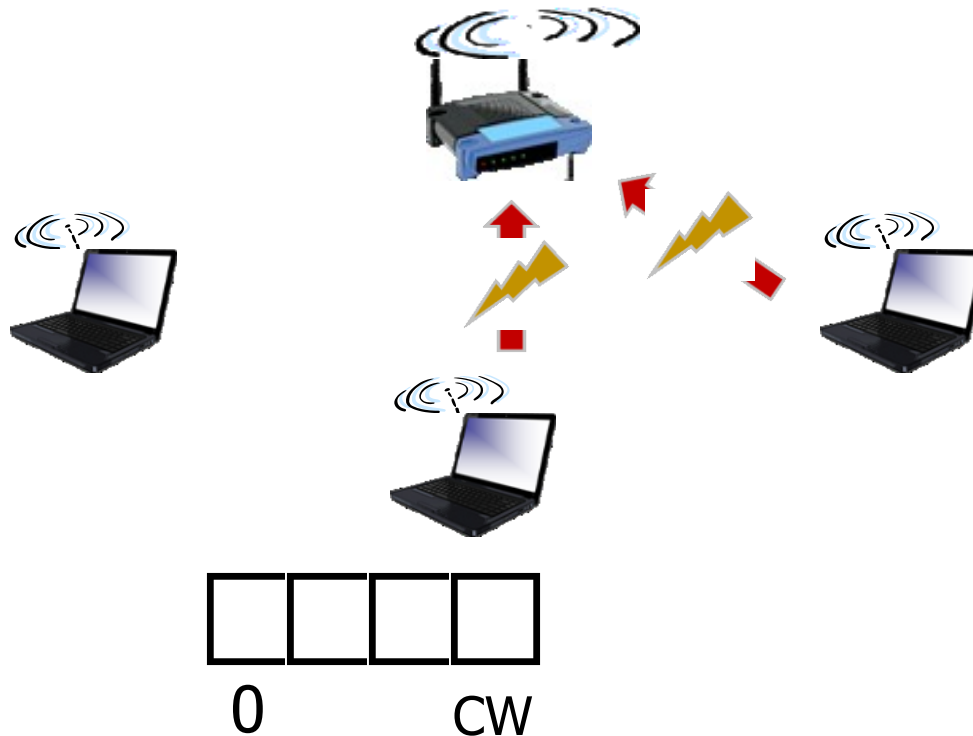
- *CW (Contention Window)*
  - O quadro enviado pode colidir e o ACK não será recebido



0 CW

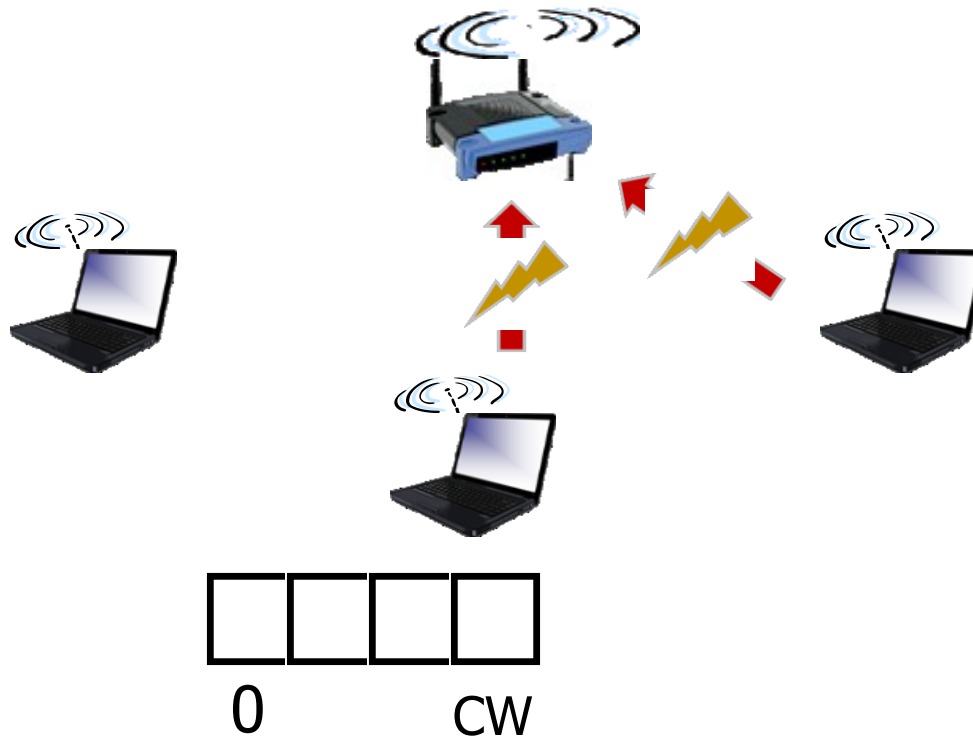
# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *CW (Contention Window)*
  - Dobra-se o tamanho de CW e realiza-se *backoff*
    - Até  $CW_{max}$

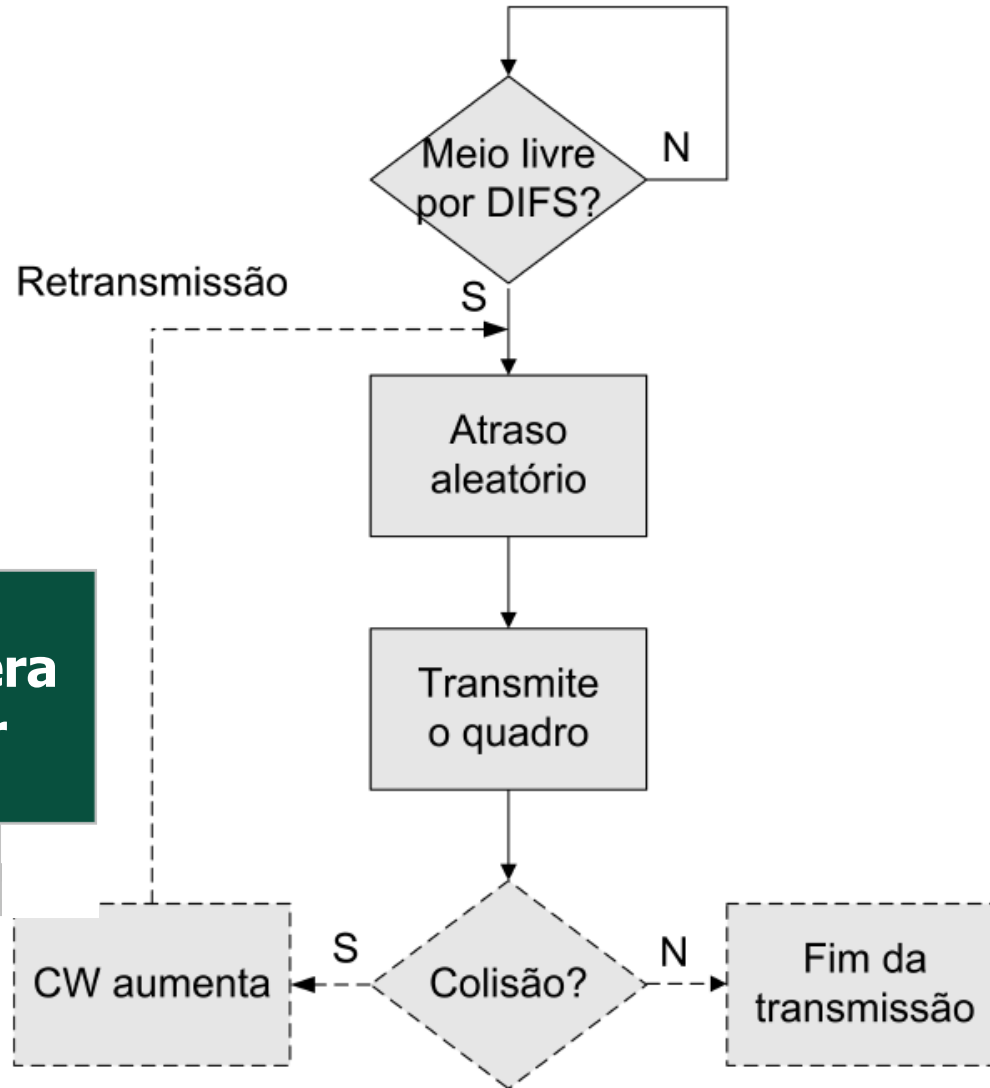


# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- *CW (Contention Window)*
  - Em média, quanto maior CW mais tempo a estação ficará em *backoff*



# Lógica de transmissão do IEEE 802.11 (após o primeiro quadro)

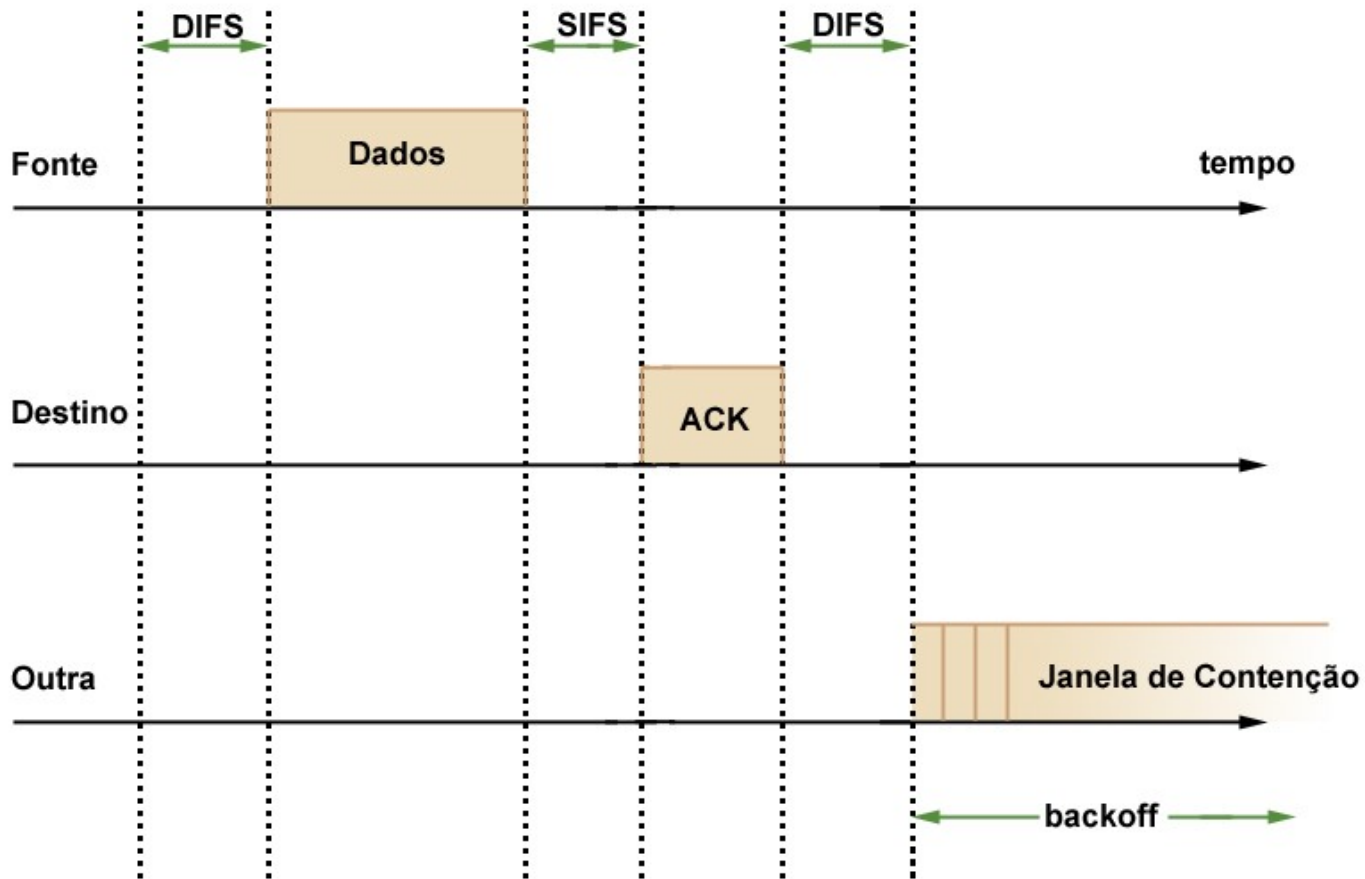


**O tempo de espera  
pode ser maior**

# DCF Modo Básico: CSMA/CA

- Resposta
  - CRC
  - Reconhecimento positivo – ACK
    - $SIFS < DIFS$

# DCF Modo Básico: CSMA/CA



**É possível reduzir a probabilidade  
de colisões de quadros de dados  
com CSMA/CA?**

- Colisões de quadros maiores geram desperdício
- Permitir que o transmissor **reserve** o meio ao invés de disputá-lo
  - Transmissor envia pequenos quadros para o receptor solicitando a permissão para envio usando o CSMA
    - RTS (*Request To Send*)
    - Podem colidir uns com os outros, mas são pequenos
  - Receptor envia em difusão quadro autorizando o envio
    - CTS (*Clear To Send*)
  - CTS é ouvido por todas as outras estações
    - Transmissor envia o quadro de dados
    - Outras estações adiam suas transmissões

- Colisões de quadros maiores geram desperdício
- Permitir que o transmissor **reserve** o meio ao invés de disputá-lo

- Transmissor envia pequenos quadros de dados solicitando autorização

**É possível evitar colisões de quadros de dados usando pequenos quadros de reserva**

Receptor envia em difusão quadro autorizando o envio

- CTS (*Clear To Send*)

- CTS é ouvido por todas as outras estações

- Transmissor envia o quadro de dados
- Outras estações adiam suas transmissões

# DCF Modo com RTS/CTS

- Estação transmite um RTS para o destino
  - *Request To Send*
  - Quadro curto
  - Contém o tempo necessário para a transmissão e a confirmação de recepção do quadro de dados
  - Estações vizinhas (no alcance de transmissão da fonte) irão adiar as suas transmissões

# DCF Modo com RTS/CTS

- Destino responde com um CTS
  - *Clear To Send*
  - Também o tempo necessário para a transmissão e a confirmação de recepção do quadro de dados
  - Quadro curto para que as estações vizinhas (no alcance do destino) escutem a transmissão
    - Evitem transmitir enquanto o quadro de dados (grande) estiver sendo enviado

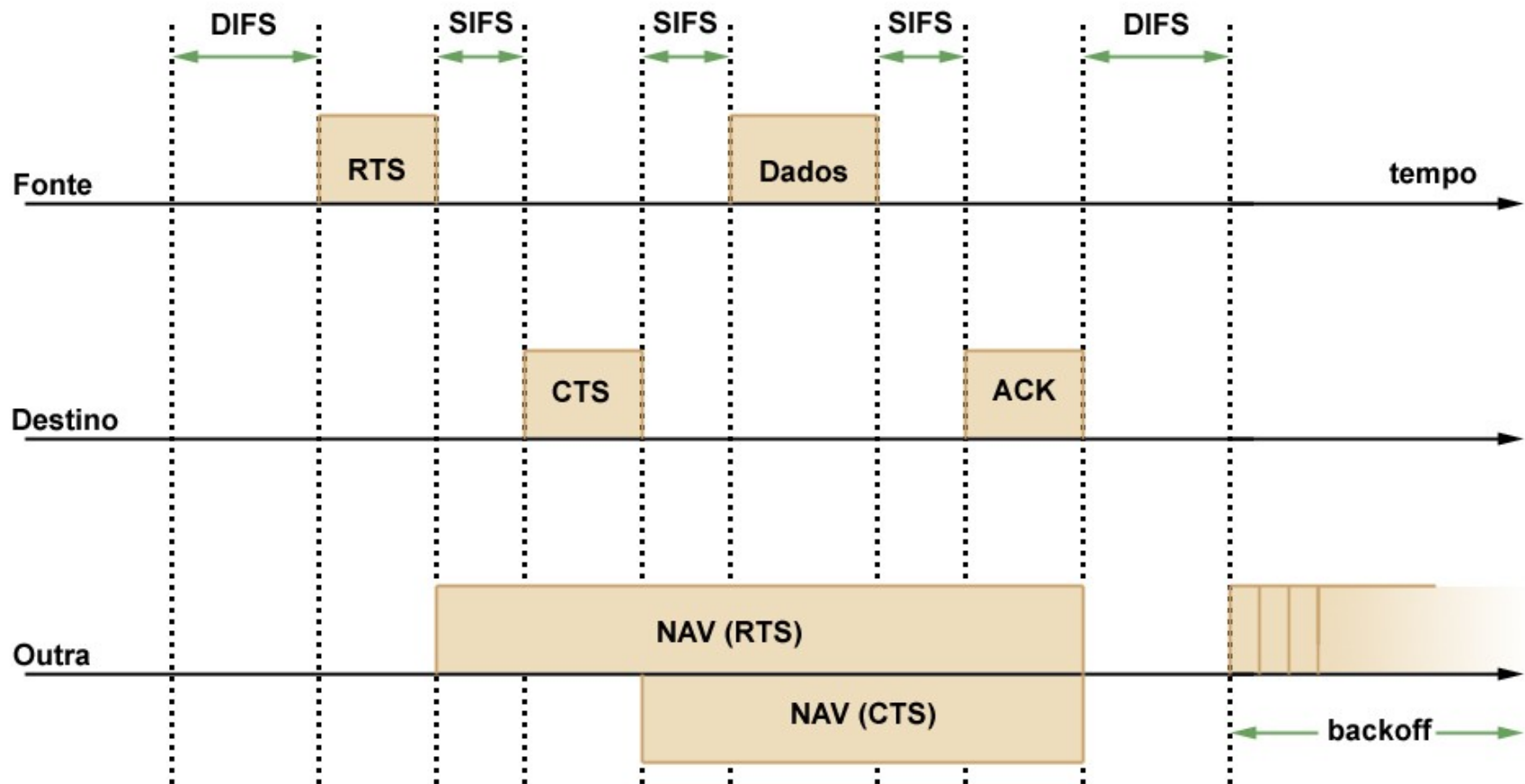
# DCF Modo com RTS/CTS

- Quadros RTS e CTS enviados em uma das taxas básicas da rede
  - Estações que ouvem RTS e CTS possam entender as informações de duração da comunicação
  - Taxa básica: “entendida” por todas as estações
- Detecção virtual de portadora
  - Vetor de alocação de rede (NAV)
    - Armazena informações relativas à ocupação do meio
- Evita o problema do terminal escondido

# DCF Modo com RTS/CTS

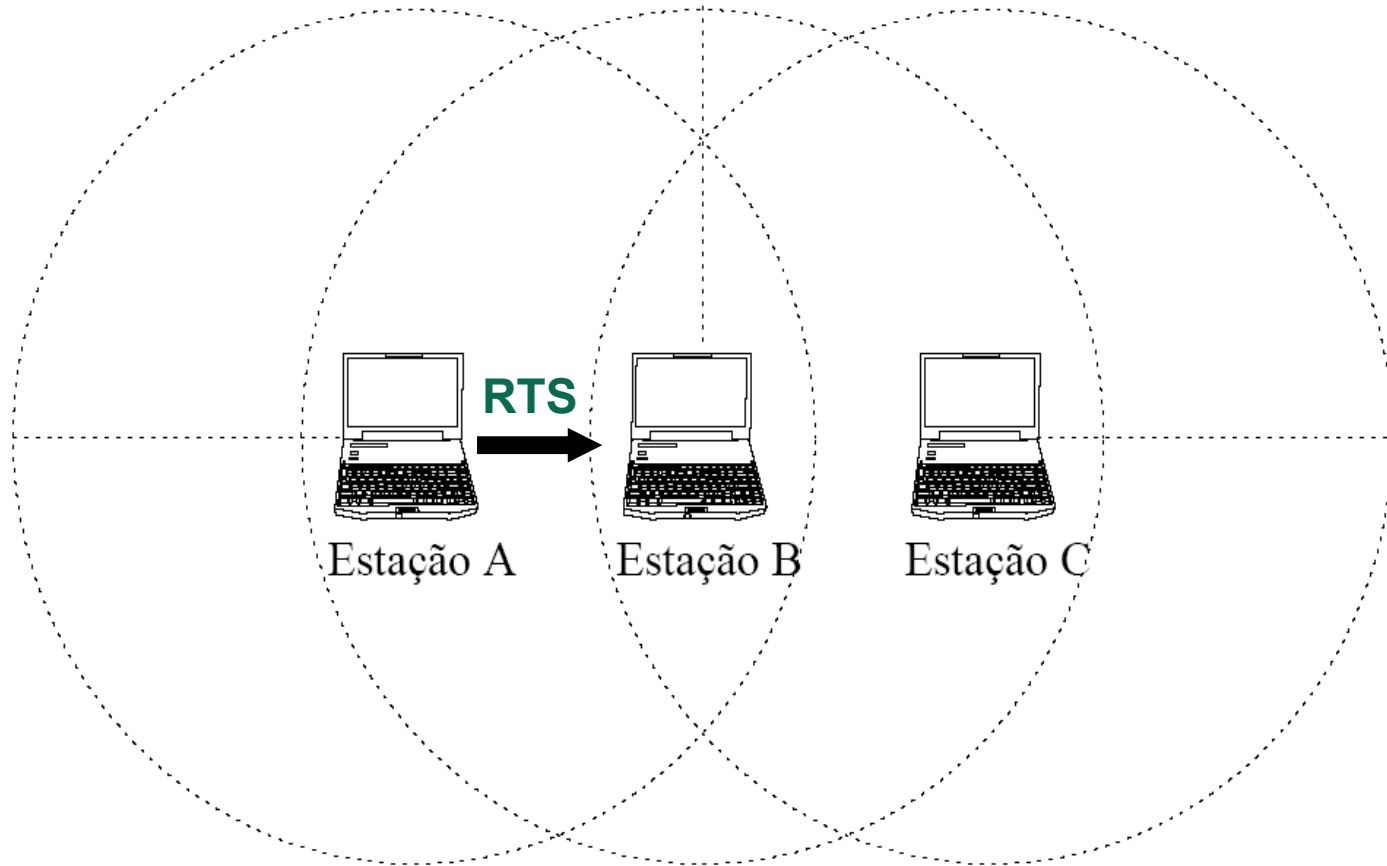
- Intervalos entre quadros
  - DIFS
    - RTS
  - SIFS
    - CTS
    - Dados
    - ACK

# DCF Modo com RTS/CTS



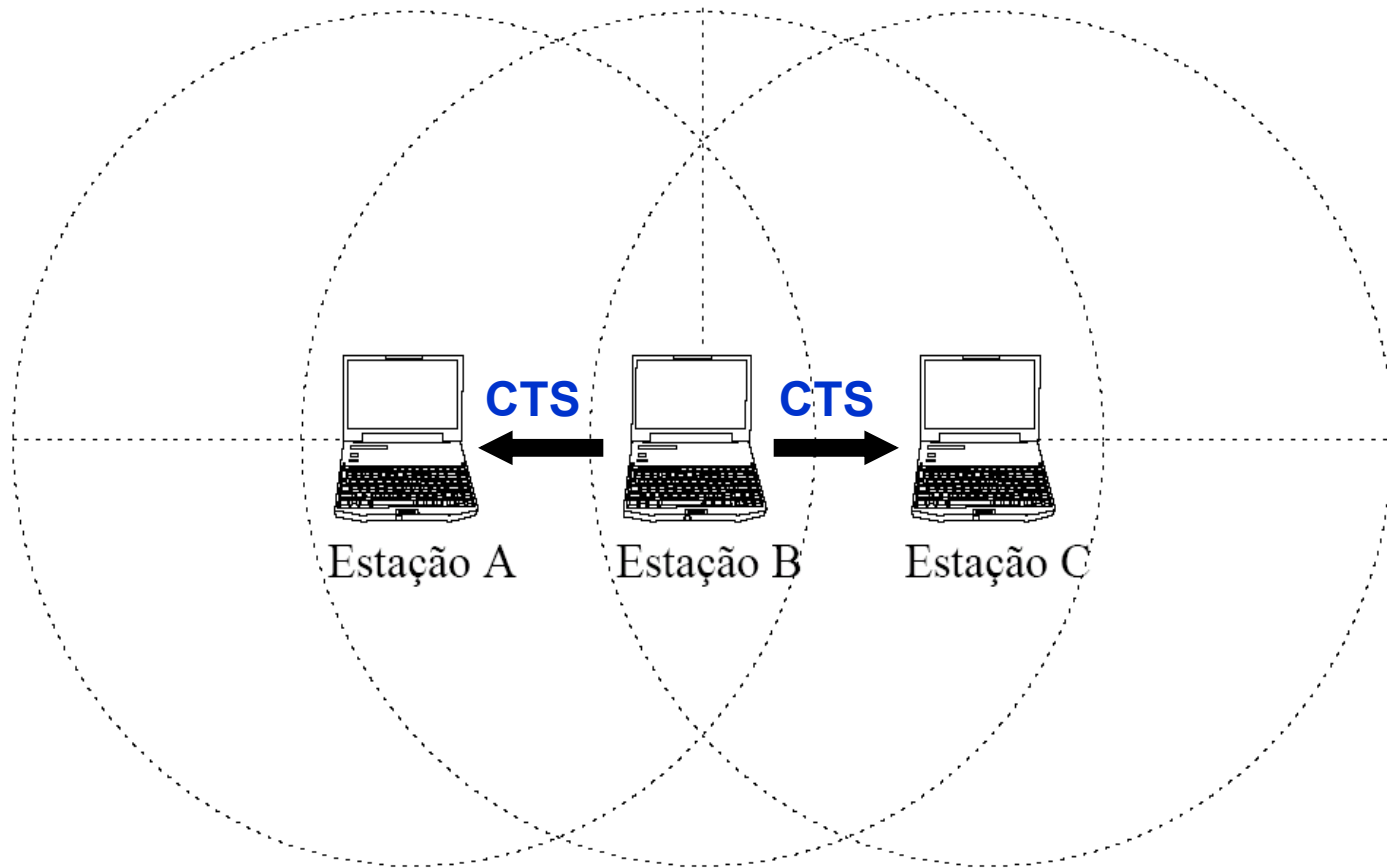
# DCF Modo com RTS/CTS

## Uso de RTS e CTS para o problema do terminal escondido



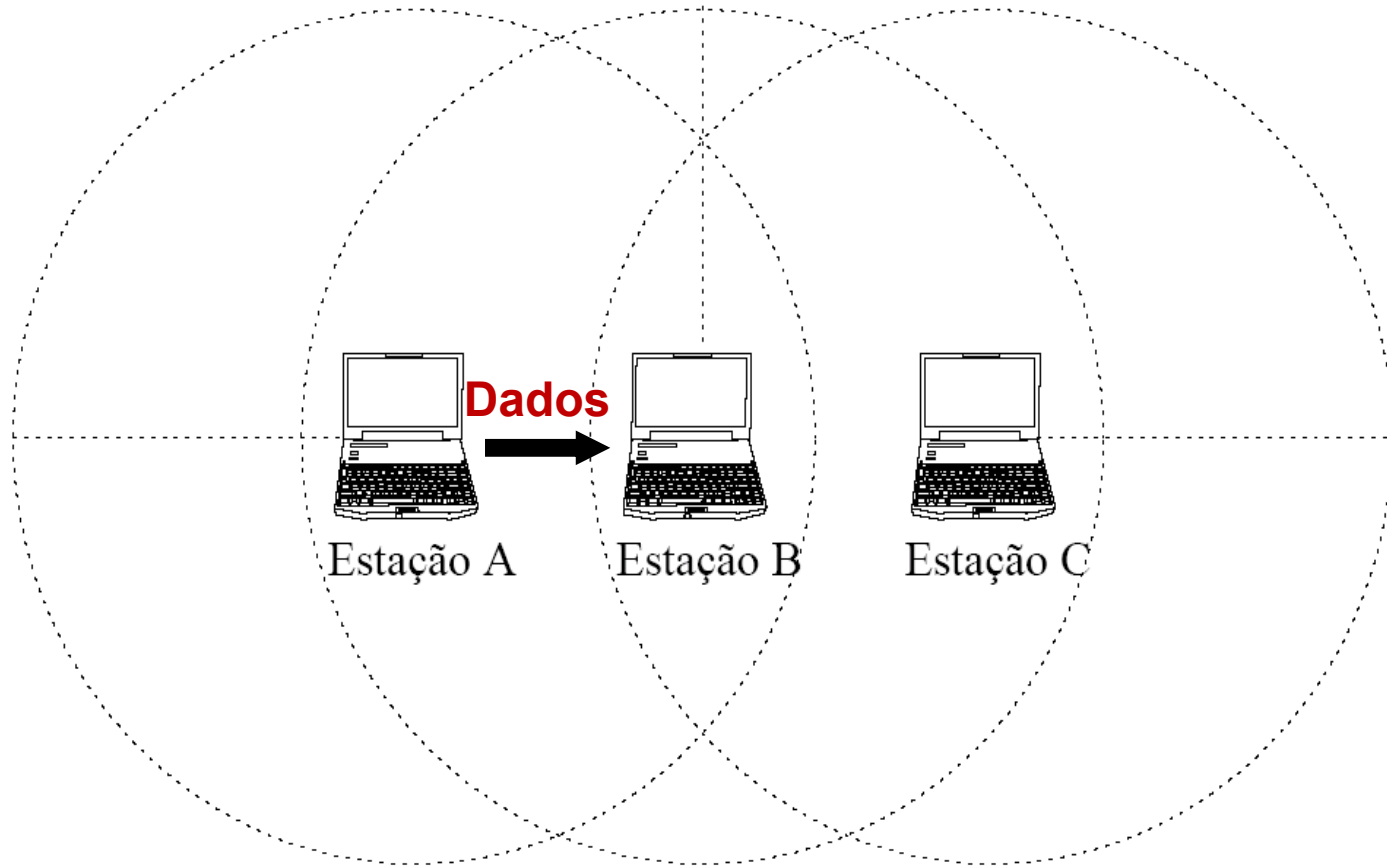
# DCF Modo com RTS/CTS

## Uso de RTS e CTS para o problema do terminal escondido



# DCF Modo com RTS/CTS

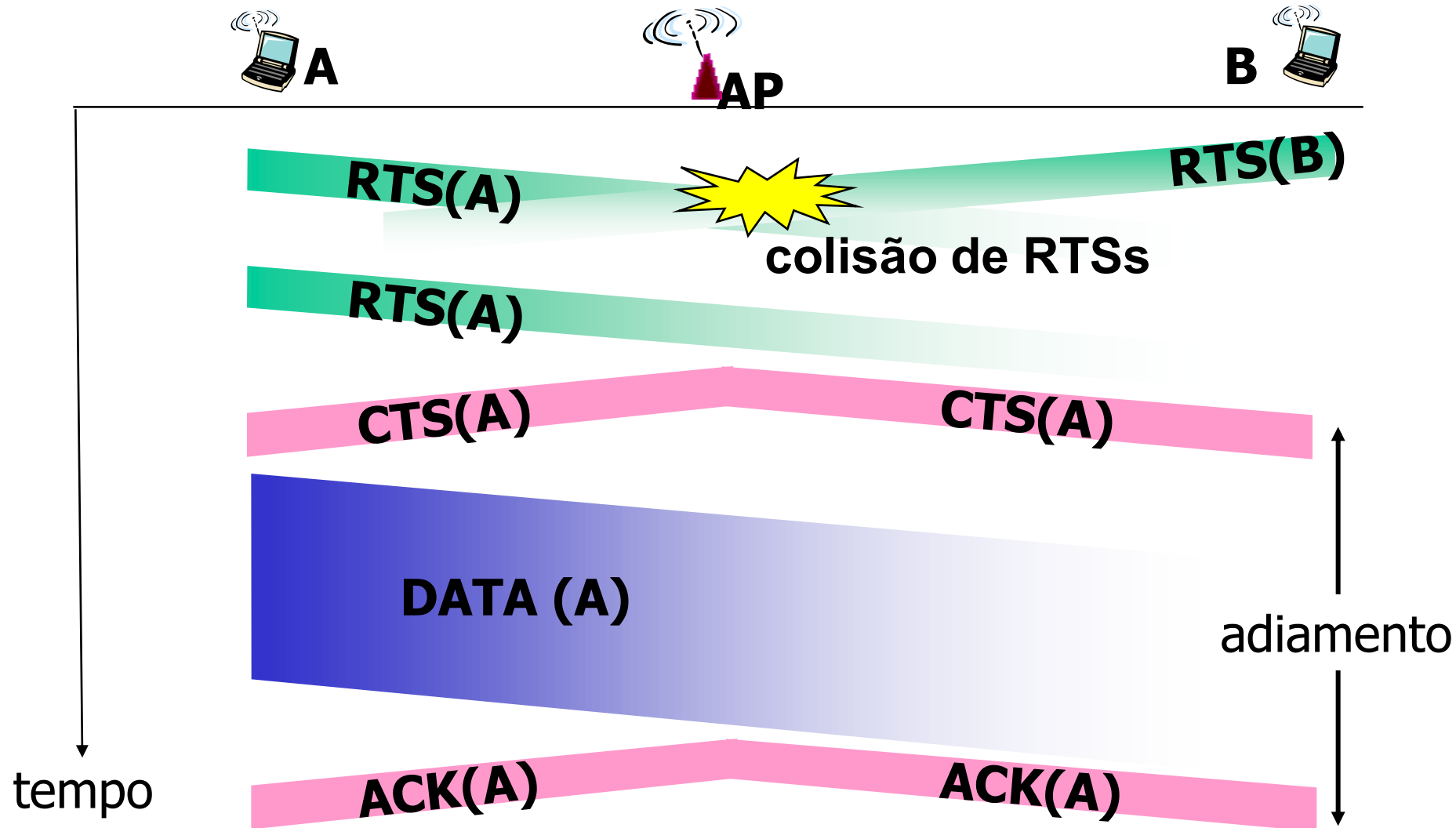
## Uso de RTS e CTS para o problema do terminal escondido



# DCF Modo com RTS/CTS

- Podem existir ainda colisões de RTS
  - Diferenças entre alcances de transmissão e interferência
    - Em geral, o alcance de interferência é duas vezes maior do que o alcance de transmissão para redes IEEE 802.11

# Colisão de Pedidos de Reserva



# DCF Modo com RTS/CTS

- Podem existir ainda colisões de RTS
  - Diferenças entre alcances de transmissão e interferência
    - Em geral, o alcance de interferência é duas vezes maior do que o alcance de transmissão para redes IEEE 802.11
  - Colisões podem ocorrer em um nó intermediário
  - Eficiência diminuída devido à sobrecarga
    - Uso de RTS/CTS a partir de um tamanho mínimo de quadro

# DCF Modo com RTS/CTS

- Podem existir ainda colisões de RTS
  - Diferenças entre alcances de transmissão e interferência
    - Em geral, o alcance de interferência é duas vezes maior do que o alcance de transmissão para redes IEEE 802.11
  - Colisões podem ocorrer em um nó intermediário
  - Eficiência diminuída devido à sobrecarga
    - Uso de RTS/CTS a partir de um tamanho mínimo de quadro

**Colisões de quadros de RTS “duram menos” do que a colisão de quadros de dados, devido ao tamanho dos quadros**

# DCF Modo com RTS/CTS

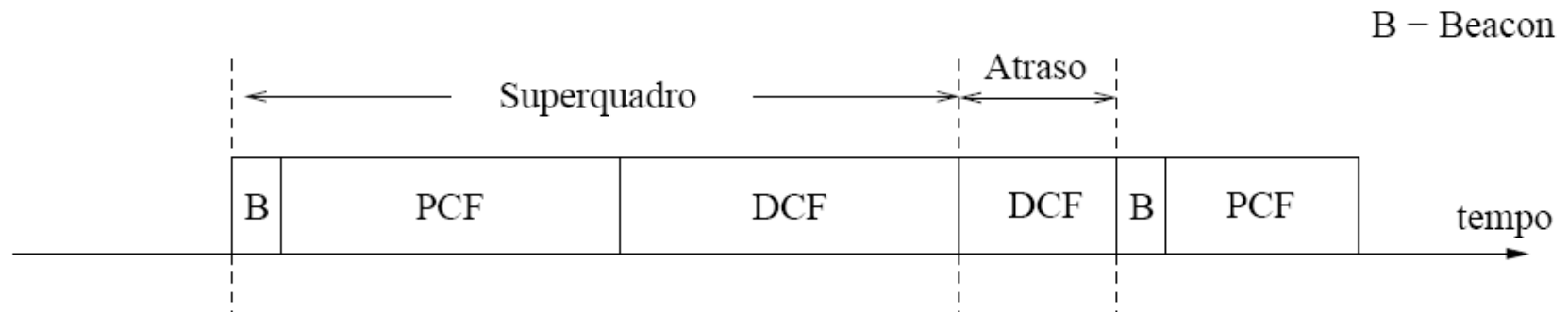
- Quadros de RTS/CTS são enviados apenas quando o tamanho de um pacote de dados excede um limiar
  - *RTS threshold*
    - Varia de 0-2347 bytes

# Mecanismo PCF

- Opcional
- Usado para tráfegos de tempo real
- Coordenador de ponto (no ponto de acesso) consulta cada estação
  - Transmissão sem contenção
  - Baseada numa lista de estações a serem consultadas
- Tempo de acesso dividido em períodos de superquadros
  - Período livre de contenção (*Contention Free Period* - CFP)
  - Período de contenção (*Contention Period* - CP)
    - Usa o DCF

# Mecanismo PCF - CFP

- Coordenador de ponto faz consultas (*polling*)
- Cada estação só pode transmitir quando receber uma consulta
- Geralmente as estações recebem dados quando são consultadas
- No fim do CFP começa um CP

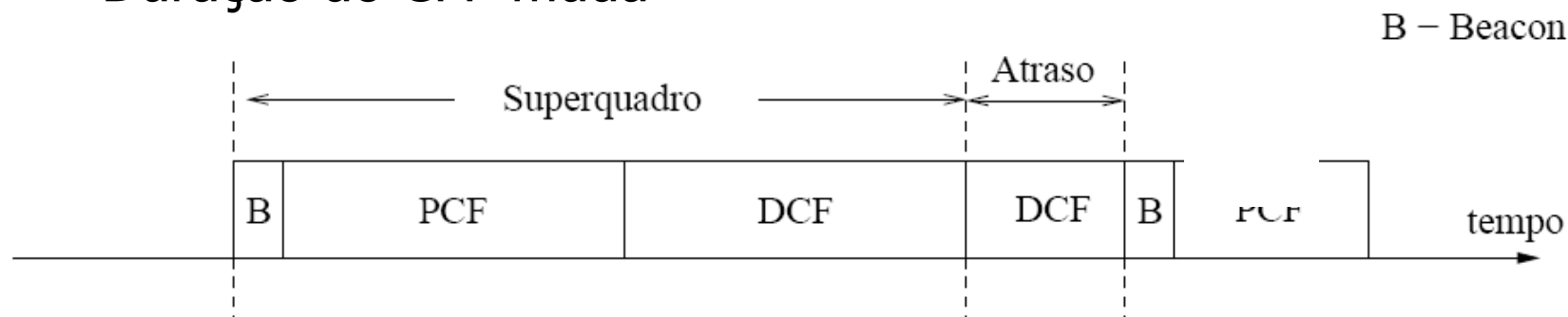


# Mecanismo PCF

- Coordenador inicia e controla o CFP
- Coordenador escuta o meio livre por PIFS
  - *Point Coordination InterFrame Space*
  - SIFS < PIFS < DIFS
  - Início de um CFP
    - Difusão de um sinal de *beacon*
  - $CFP_{maxduration}$  adicionada aos respectivos NAVs

# Mecanismo PCF

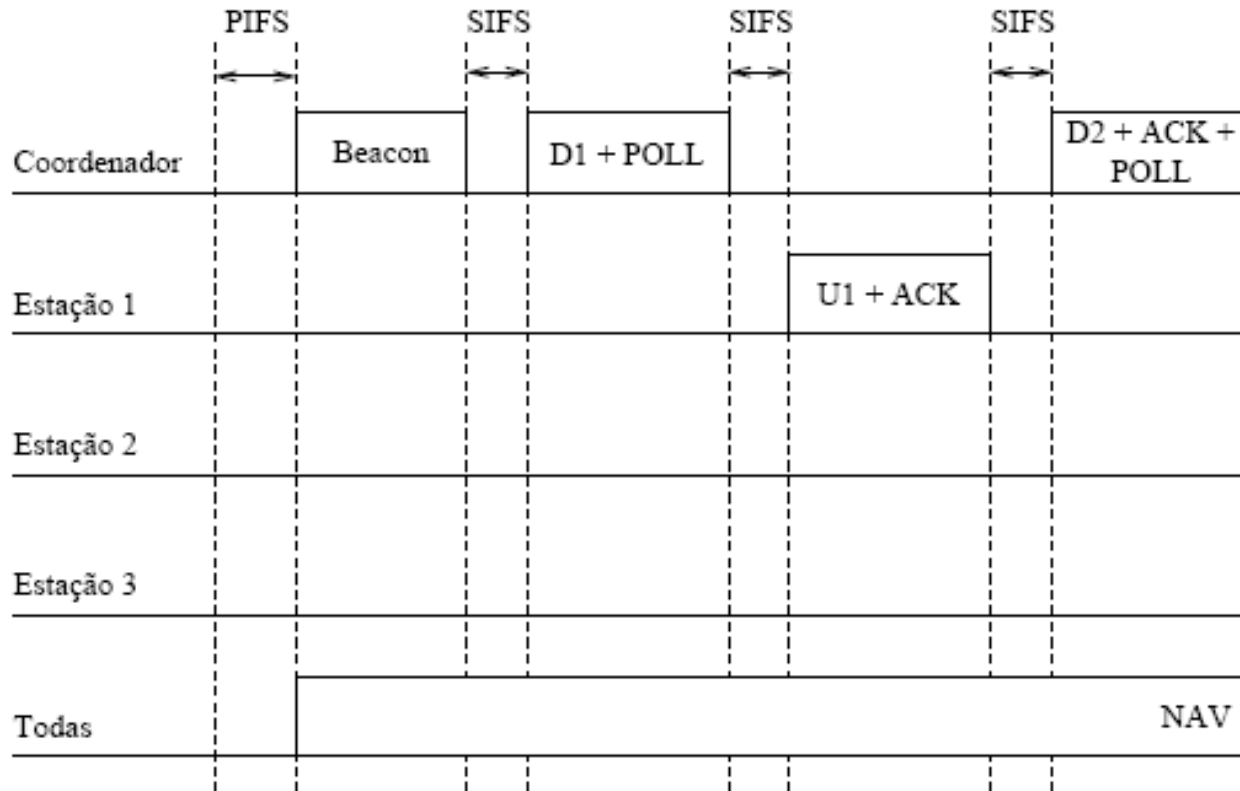
- CFP pode terminar através do envio de um  $CF_{end}$  pelo coordenador
  - Por exemplo quando a rede está com pouca carga
- Início de um CFP pode ser adiado
  - Transmissão no modo DCF
  - Duração do CFP muda



# Mecanismo PCF

- Chega a vez de uma estação transmitir
  - Coordenador envia um quadro de dados (se existir) dentro de um quadro de consulta (*piggyback*)
- Resposta
  - ACK após SIFS (com dados se for o caso)

# Mecanismo PCF



**Dx = Data**

**POLL = CF-Poll**

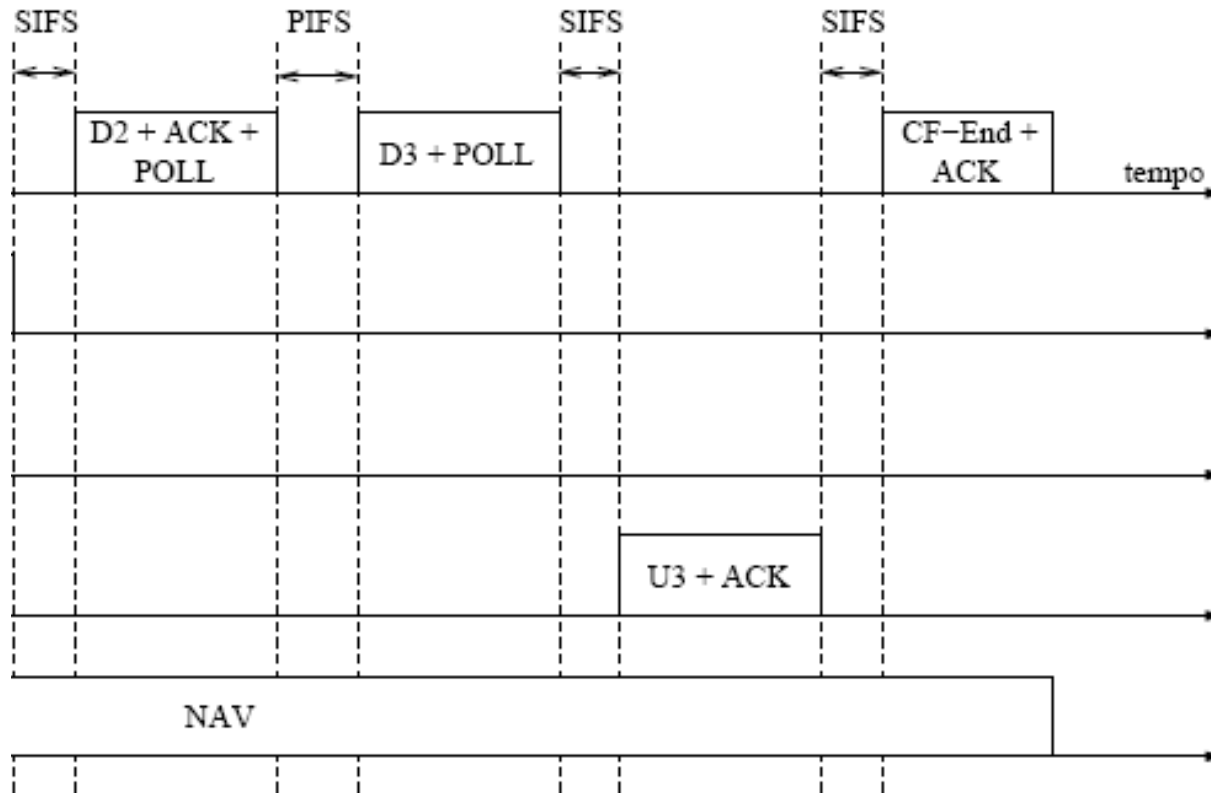
**ACK = CF-ACK**

**Dx + POLL = Data + CF-Poll**

**Dx + ACK + POLL = Data + CF-Poll + CF-ACK**

**CF-End + ACK = CF-End + CF-ACK**

# Mecanismo PCF



■■■

**$Dx = \text{Data}$**

**$POLL = \text{CF-Poll}$**

**$ACK = \text{CF-ACK}$**

**$Dx + POLL = \text{Data} + \text{CF-Poll}$**

**$Dx + ACK + POLL = \text{Data} + \text{CF-Poll} + \text{CF-ACK}$**

**$CF-End + ACK = \text{CF-End} + \text{CF-ACK}$**

# Mecanismo PCF

- Após transmitir a todas as estações de uma lista de consultas, coordenador pode enviar quadros a qualquer estação
  - Se ainda houver tempo
- Estações pedem para entrar na lista de consultas através de quadros de pedidos de associação com o ponto de acesso
  - Pedidos incluem um campo que indica se a estação é capaz de responder a enquetes durante o CFP

- Problemas
  - Geração de atraso indesejado
    - Diminuição do CFP quando uma estação continua transmitindo após o tempo previsto para o superquadro
    - Limitação da duração máxima do CFP que pode provocar o adiamento de uma transmissão para o próximo CFP
  - Sobrecarga devido ao *polling*

# Formato dos Quadros

- Transmitido em taxa variável
  - Dados
- Transmitidos em uma taxa básica (“todos escutam”)
  - RTS
  - CTS
  - ACK

# Quadro de Dados

- Controle de quadro (2 bytes)
  - Subdividido em 11 campos
  - Versão (2 bits)
  - Tipo (2 bits)
    - Dados
    - Controle
    - Gerenciamento
  - Subtipo (4 bits)
    - Função do quadro

Octetos	2	2	6	6	6	2	6	$\geq 0$	4
	Controle de quadro	Duração	Endereço 1	Endereço 2	Endereço 3	Sequência	Endereço 4	Dados	FCS

# Quadro de Dados

- Controle de quadro (cont.)
  - Para DS – *Distribution System* (1 bit)
    - Quadro destinado ao sistema de distribuição
  - De DS (1 bit)
    - Quadro deixando o sistema de distribuição
  - MF (1 bit)
    - Mais fragmentos do quadro
  - Repetir (1 bit)
    - Retransmissão de um quadro

Octetos	2	2	6	6	6	2	6	$\geq 0$	4
	Controle de quadro	Duração	Endereço 1	Endereço 2	Endereço 3	Sequência	Endereço 4	Dados	FCS

# Quadro de Dados

- Controle de quadro (cont.)
  - Potência (1 bit)
    - Transmissor está no modo dormindo
  - Mais (1 bit)
    - Transmissor tem mais quadros para o receptor
  - WEP (1 bit)
  - Ordem (1 bit)
    - Sequência de quadros deve ser processada em ordem

Octetos	2	2	6	6	6	2	6	$\geq 0$	4
	Controle de quadro	Duração	Endereço 1	Endereço 2	Endereço 3	Sequência	Endereço 4	Dados	FCS

# Quadro de Dados

- Duração (2 bytes)
  - Tempo de ocupação pelo quadro e sua confirmação
  - Usado no NAV
- Endereço 1 (6 bytes)
  - Receptor físico
- Endereço 2 (6 bytes)
  - Transmissor físico
- Endereço 3 (6 bytes)
  - Lógico

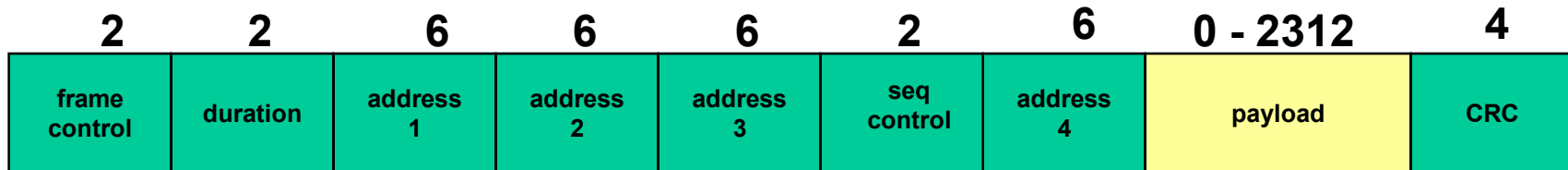
Octetos	2	2	6	6	6	2	6	$\geq 0$	4
	Controle de quadro	Duração	Endereço 1	Endereço 2	Endereço 3	Sequência	Endereço 4	Dados	FCS

# Quadro de Dados

- Sequência (2 bytes)
  - Número de sequência de quadro (12 bits)
  - Número de sequência de fragmento (4 bits)
- Endereço 4 (6 bytes)
  - Lógico
- Dados
  - Não precisa de tamanho mínimo
  - Tamanho máximo de 2312 bytes
- CRC (4 bytes)

Octetos	2	2	6	6	6	2	6	$\geq 0$	4
	Controle de quadro	Duração	Endereço 1	Endereço 2	Endereço 3	Sequência	Endereço 4	Dados	FCS

# Quadro de Dados



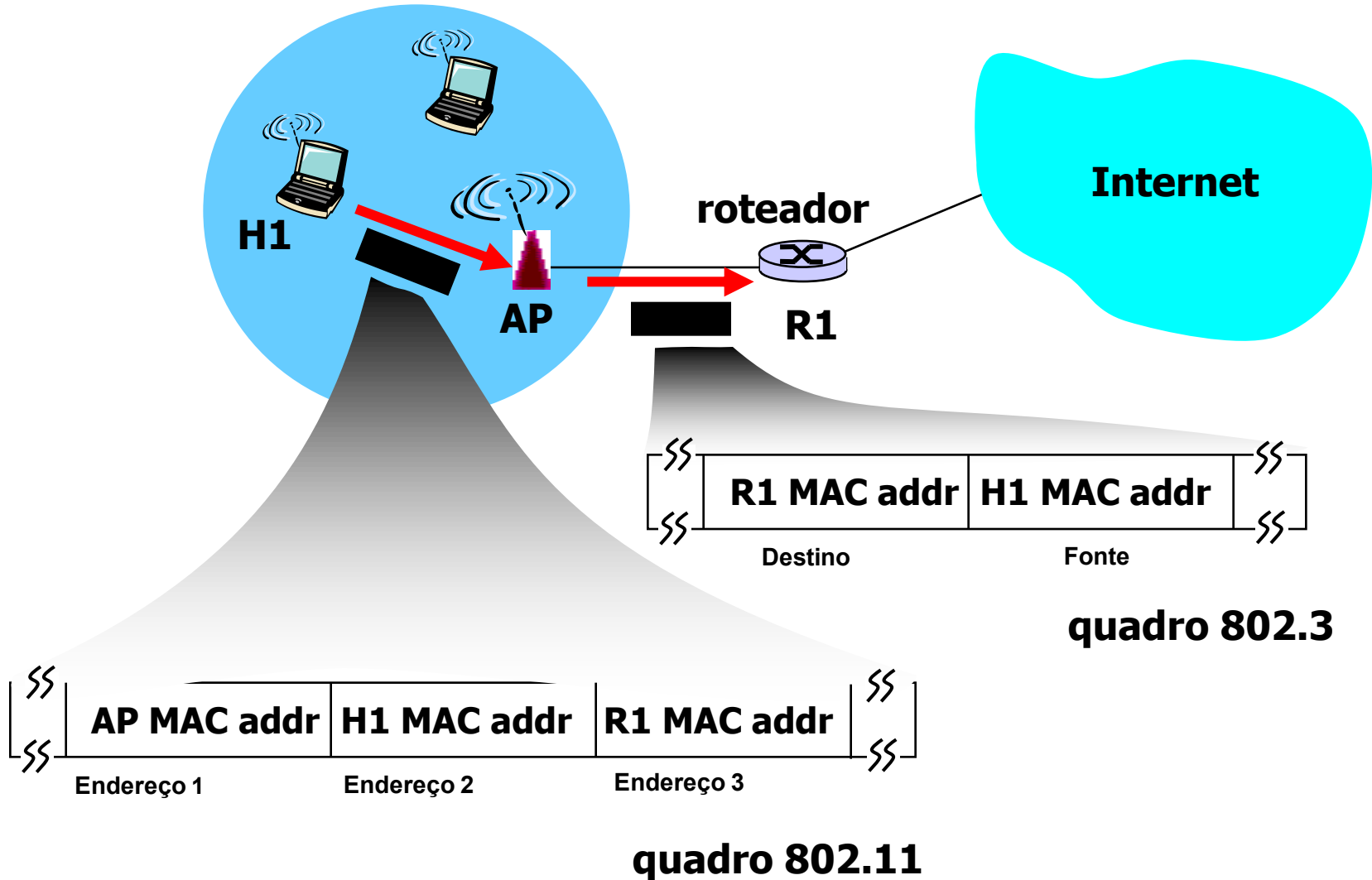
**Endereço 1: Endereço MAC da estação ou do AP que receberá esse quadro**

**Endereço 2: Endereço MAC da estação ou do AP transmitindo esse quadro**

**Endereço 3: Endereço MAC da interface do roteador na qual o AP está conectado**

**Endereço 4: usado somente no modo *ad hoc***

# Quadro de Dados



- Endereçamento
  - Ad Hoc
    - De DS = 0
    - Para DS = 0
    - Endereços DA (destino), AS (fonte), BSSID
  - Infraestruturada, de PA
    - De DS = 1
    - Para DS = 0
    - Endereços DA, BSSID, transmissor lógico

- Endereçamento (cont.)
  - Infraestruturada, para PA
    - De DS = 0
    - Para DS = 1
    - Endereços BSSID, SA, receptor lógico
  - Infraestruturada, dentro do DS sem-fio
    - De DS = 1
    - Para DS = 1
    - Endereços RA, TA, DA, SA

# Quadro RTS

- Controle de quadro
- Duração
  - Tempo em microssegundos para enviar CTS, dados e ACK
- RA
  - Endereço de destino

Octetos	2	2	6	6	4
	Controle de quadro	Duração	RA	TA	FCS

# Quadro RTS

- TA
  - Endereço de origem
- FCS
  - CRC

Octetos	2	2	6	6	4
	Controle de quadro	Duração	RA	TA	FCS

# Quadro CTS

- Controle de quadro
- Duração
  - Tempo em microssegundos para enviar dados e ACK
- RA
  - Endereço de destino
- FCS
  - CRC

Octetos	2	2	6	4
	Controle de quadro	Duração	RA	FCS

# Quadro ACK

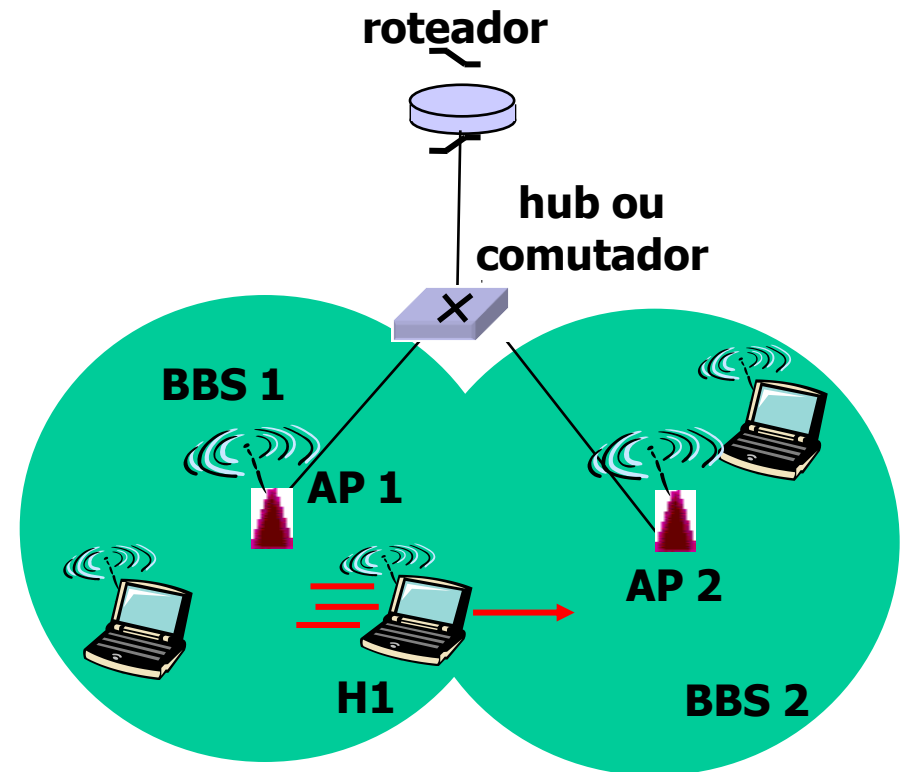
- Controle de quadro
- Duração
  - 0 se MF = 0 no quadro de dados anterior
  - Tempo em microssegundos para enviar dados e ACK se MF = 1 no quadro de dados anterior
- RA
  - Endereço de destino
- FCS
  - CRC

Octetos	2	2	6	4
	Controle de quadro	Duração	RA	FCS

# Mecanismos Avançados

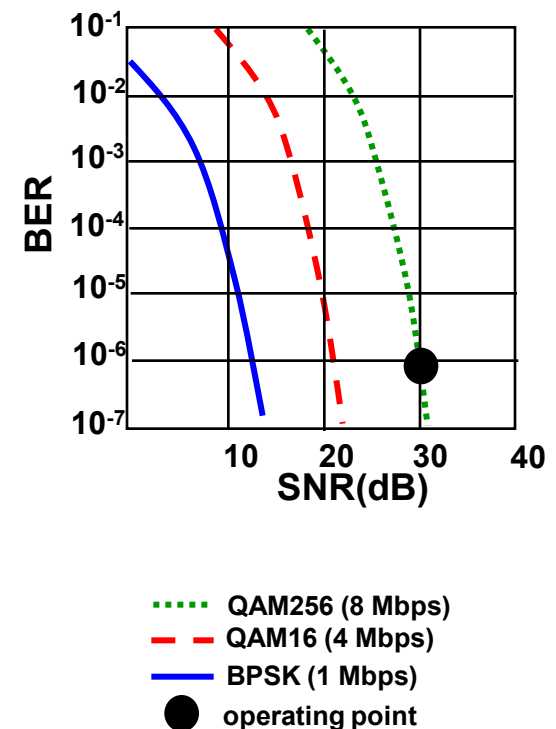
# Mobilidade dentro da Sub-Rede

- H1 permanece na mesma sub-rede IP
  - Endereço IP pode permanecer o mesmo
- Computador: a qual AP H1 está associado?
  - Auto-aprendizado
    - O computador irá observar um quadro vindo de H1 e “se lembra” qual porta deve ser usada para alcançar H1



# Seleção de Taxas

- Estações e pontos de acesso
  - Mudam dinamicamente a taxa de transmissão
    - Técnica de modulação
  - Condições variáveis do meio
    - Ex.: mobilidade
      1. SNR diminui, BER aumenta enquanto a estação se move para fora do alcance do AP
      2. Quando a BER se torna muito alta, mude para uma taxa de transmissão mais baixa e com um BER menor



# Seleção de Taxas

- Implementação não é especificada pelo padrão
  - Definida pelos fabricantes
- *Auto Rate Fallback* (ARF)
  - Usado por muitos dispositivos comerciais
  - Se uma estação envia **dois** quadros seguidos sem receber um ACK
    - Taxa de transmissão é reduzida para a próxima mais baixa
  - Se uma estação envia **dez** quadros seguidos e todos são reconhecidos ou se um temporizador que registra o tempo desde a última redução de taxa estoura
    - Taxa de transmissão é aumentada para a próxima mais alta

# Seleção de Taxas

- 802.11 “puro”
  - 1\* ou 2 Mb/s
- 802.11b
  - 1\*, 2\*, 5.5 e 11 Mb/s
- 802.11g
  - “G-only”: 6\*, 9, 12\*, 18, 24\*, 36, 48, 54 Mb/s
  - “BG”: 1\*, 2\*, 5.5, 6, 9, 11\*, 12, 18, 24, 36, 48 e 54 Mb/s

\* Taxas básicas

- Anomalia
  - Modo infraestruturado
  - Desempenho pode ser degradado na presença de estações transmitindo a taxas menores
    - Uma estação “mais lenta” ao transmitir um pacote de tamanho  $T$ , ocupa o meio por um período maior quando comparada a uma estação “mais rápida”
      - A estação de maior taxa terá sua vazão reduzida para um valor próximo ao da estação que transmite a uma taxa menor
  - Causada pelo CSMA/CA
    - Atribui igual probabilidade de acesso ao meio para todas as estações, independentemente de suas taxas

- Modo de economia de energia definido pelo IEEE 802.11
  - Alternar os estados de operação para economizar energia
- Dois estados
  - Ativo
    - Estação pode transmitir ou receber pacotes a qualquer instante
  - Dormindo
    - Estação não pode enviar nem receber pacotes
- Para que o modo de economia de energia funcione
  - Todas as estações devem estar ativas ao mesmo tempo e em intervalos regulares

# Controle de Potência

- Para o padrão IEEE 802.11b
  - Ocioso: não recebe e nem transmite, mas não está dormindo

Estado	Potência (W)	Relação com Poc
Dormência	0,05	0,07 x Poc
Ocioso	0,75	Poc
Rx	0,90	1,2 x Poc
Tx	1,35	1,8 x Poc

- Estação para AP
  - “Estou indo dormir até o próximo *beacon*”
  - AP sabe que não deve transmitir quadros para essa estação
    - Armazena quadros
  - Estação acorda antes do próximo *beacon*
    - Intervalo entre *beacons* é conhecido

- Quadro de *beacon*
  - Contém a lista de estações com quadros Estação-para-AP a serem transmitidos
  - Estação ficará acordada se possui quadros Estação-para-AP a serem transmitidos
  - Do contrário, dorme de novo até o próximo *beacon*

- 2005
- Suporte a Qualidade de Serviço (QoS) na subcamada MAC
  - Seguindo a abordagem do DiffServ
- 802.11 original
  - Serviço de melhor esforço
  - Parte do tempo de acesso ao meio desperdiçada com
    - Fragmentações
    - Espaços entre quadros
    - Reconhecimentos

- Objetivo
  - Prover suporte a aplicações que precisam de QoS
    - Voz, áudio e vídeo
- Define uma função de acesso chamada HCF
  - *Hybrid Coordination Function*
- HCF inclui
  - Mecanismo de acesso baseado em contenção
    - *Enhanced Distributed Channel Access* - EDCA
  - Mecanismo controlado de modo centralizado
    - *HCF Controlled Channel Access* - HCCA

- Tratamento diferenciado para classes de tráfego (*Traffic Classes* - TCs) com diferentes requisitos
- Diferença para redes IEEE 802.11
  - QSTAs → *QoS enhanced Stations*
  - QAP → *QoS enhanced Access Point*
  - QBSS → *QoS enhanced BSS*

- Oportunidade de transmissão ( *Transmission Opportunity - TXOP*)
  - Intervalo de tempo limitado no qual a estação tem o direito de transmitir uma série de quadros
  - Definida através de um tempo de início e de uma duração máxima

# IEEE 802.11e - EDCA

- QoS baseada na prioridade de acesso ao meio
- Diferenciação através de
  - Variação da quantidade de tempo que uma estação escuta o meio livre antes do *backoff* ou da transmissão
  - Tamanho da janela de contenção a ser usada no *backoff*
  - Duração da transmissão de uma estação após obter o meio

# IEEE 802.11e - EDCA

- Oito prioridades
  - Seguindo o padrão IEEE 802.1D
- Quatro instâncias da função de coordenação
  - Executadas em paralelo
    - Como se fossem MACs virtuais
  - Associadas a categorias de acesso (*Access Categories - ACs*)
    - ACs identificam
      - Tráfego de fundo
      - Melhor esforço
      - Voz
      - Vídeo

- Diferenciação na prioridade entre as ACs dada através de diferentes valores de parâmetros
  - AIFS
    - *Arbitration Inter-Frame Space*
    - Menor tempo entre o meio livre e o começo da transmissão de um quadro ou do *backoff*
    - Equivale ao DIFS do DCF
  - $CW_{\min}$
  - $CW_{\max}$
  - Limite de TXOP

- ACs competem entre si pelas TXOPs e realizam *backoff* de forma independente
  - Duas ou mais ACs podem ter seus temporizadores expirados ao mesmo tempo
    - Estação resolve internamente esses conflitos
      - TXOP para a AC de maior prioridade
      - Outra(s) faz(em) *backoff*
    - Ganhadora pode transmitir o(s) quadro(s)
- Escolha dos parâmetros geralmente associada ao QAP
  - Valores padrões podem ser usados quando não há QAP

## Valores padrões para o DSSS e o HR-DSSS

AC	$CW_{min}$	$CW_{max}$	AIFSN	Limite de TXOP
BK	$CW_{min}$	$CW_{max}$	7	0
BE	$CW_{min}$	$CW_{max}$	3	0
VI	$(CW_{min} + 1)/2 - 1$	$CW_{min}$	2	6,016 ms
VO	$(CW_{min} + 1)/4 - 1$	$(CW_{min} + 1)/2 - 1$	2	3,264 ms

$$\mathbf{AIFS = SIFSTime + AIFSN \times SlotTime}$$

# IEEE 802.11e - HCCA

- Permite a reserva de TXOPs junto ao coordenador híbrido (HC)
- Semelhante ao PCF
  - Contudo
    - Varredura com QoS pode ocorrer durante o período de disputa
    - Escalonamento de pacotes baseado nas especificações dos tráfegos admitidos

- Outras funcionalidades
  - Reconhecimento de blocos
    - *Block Ack*
    - Agregação de diversos reconhecimentos em um quadro
    - Aumenta a eficiência do meio
    - Dois tipos
      - Imediato
      - Atrasado

- Outras funcionalidades (cont.)
  - Não utilização de reconhecimentos
    - *No Ack*
  - Estabelecimento de enlace direto
    - *Direct-Link Setup* - DLS
    - Usa um enlace entre duas estações que não passa pelo ponto de acesso

# IEEE 802.11e - Quadro de Dados

- Quadro de dados modificado
- Inclusão do campo controle de QoS (2 bytes)
  - Categoria de tráfego do quadro
  - Tipo de ACK utilizado
  - Limite de TXOP
  - Outros

Octetos	2	2	6	6	6	2	6	2	$\geq 0$	4
	Controle de quadro	Duração	Endereço 1	Endereço 2	Endereço 3	Sequência	Endereço 4	Controle de QoS	Dados	FCS

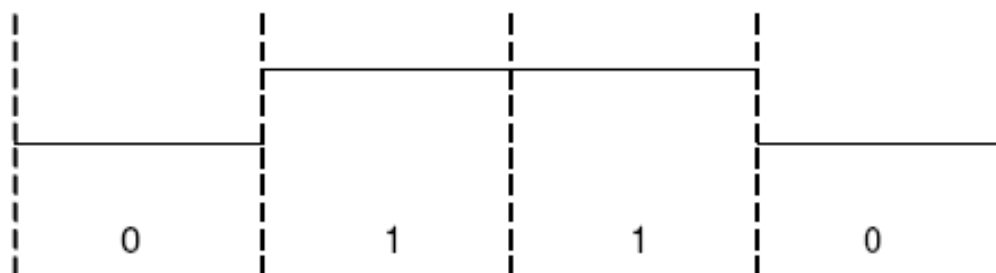
# Camada Física

# Técnicas de Transmissão

- Parte da camada física
- Bits podem ser **codificados** ou **modulados**
  - Definem como os símbolos de um alfabeto serão transmitidos

- Trabalha em banda básica
  - Preservam as faixas de frequências originais dos dados
- Transmissores e receptores mais simples e mais baratos
- Exemplos
  - NRZ
  - NRZI
  - Manchester
  - 4B/5B
  - PAM
  - Outras

- *Non Return to Zero*
- Liga-desliga (*On-Off*)
- Binária



- Transmissor e receptor tem de estar sincronizados
  - Problema principalmente quando do envio de 0s e 1s seguidos

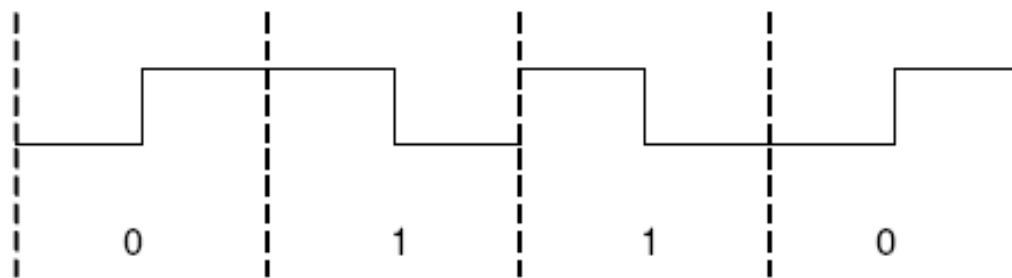
- *Non Return to Zero Inverted*
- Dados codificados através de presença ou da ausência de uma transição no início do tempo relativo a um bit
- Bit 1 → com transição
- Bit 0 → sem transição



- Resolve o problema do envio de 1s consecutivos

# Manchester

- Lida com o problema de sincronização
- Cada tempo relativo a um bit é dividido pela metade
- Bit 1 → voltagem alta, voltagem baixa
- Bit 0 → voltagem baixa, voltagem alta

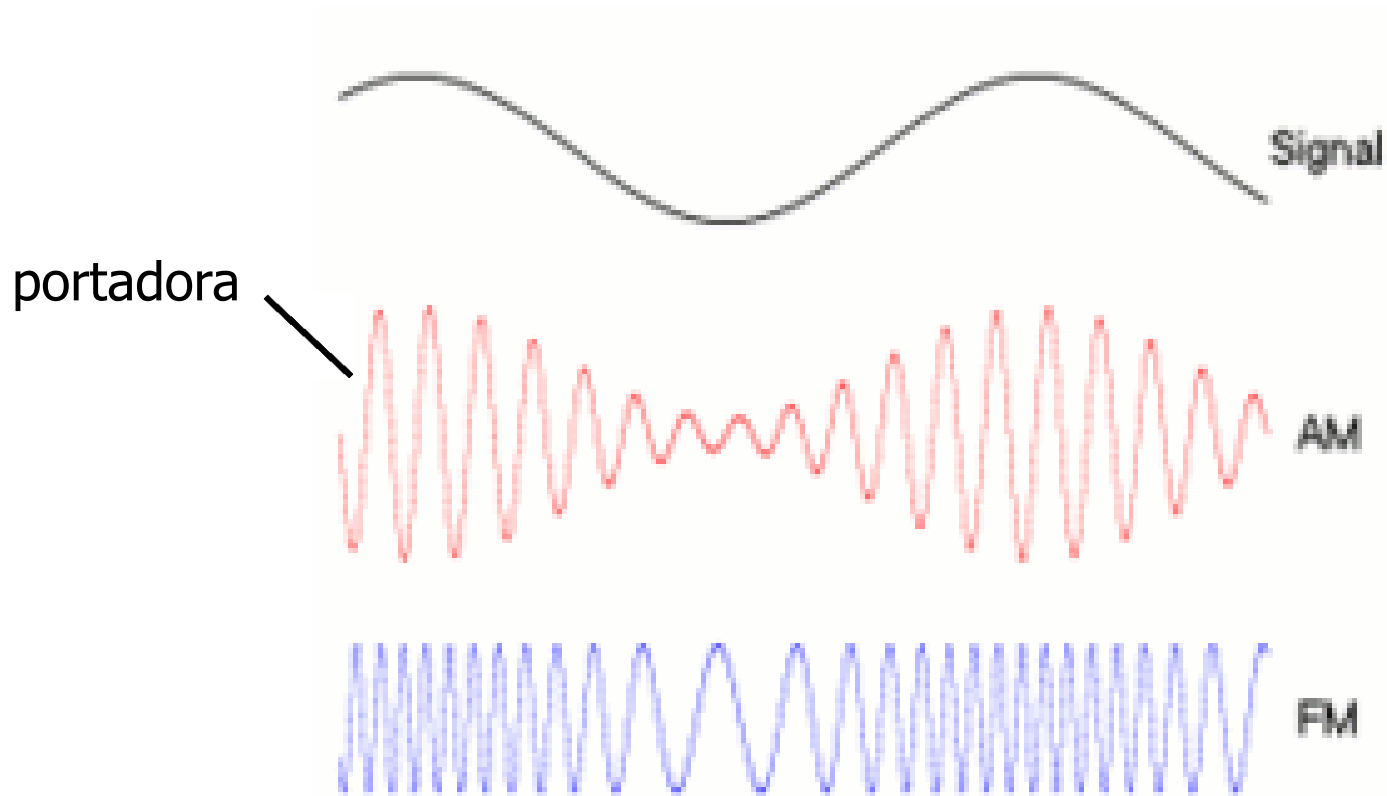


- Necessita do dobro de largura de banda da NRZ
- Usada na Ethernet 10Base-T

- Também chamada chaveamento (*keying*)
- Transforma os bits em uma maneira apropriada para transmissão
  - Geralmente através da transposição dos dados em sinais de frequências mais altas
    - Uso de uma portadora de mais alta frequência
- Senóide é geralmente usada como portadora
  - Variação da amplitude, da frequência ou da fase determina o tipo de modulação

# Modulação

- Exemplos

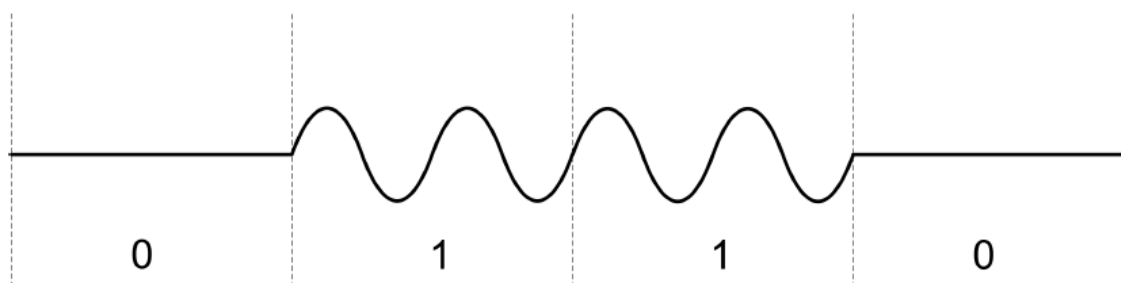


- Por que é necessária?
  - Atenuação e velocidade de propagação no meio variam com a frequência
    - Codificação em banda básica é mais usada em pequenas distâncias e baixas velocidades
  - Alguns meios como fibra óptica exigem que o sinal ocupe uma determinada faixa
  - Podem existir diversas estações que devem acessar um mesmo meio físico

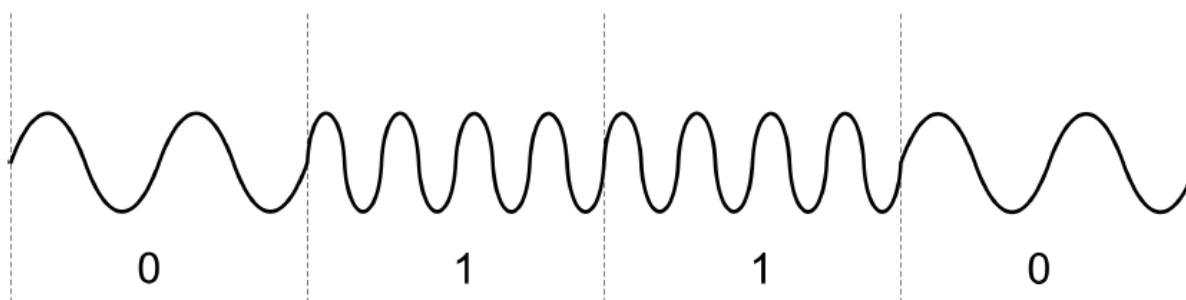
# Modulação

- Exemplos
  - ASK
  - FSK
  - PSK
  - QAM
  - Outras

- *Amplitude Shift Keying*
- M-ASK
- Varia a amplitude da portadora entre  $M$  valores
  
- BASK
- *Binary ASK*
- Usa duas amplitudes ( $M = 2$ )

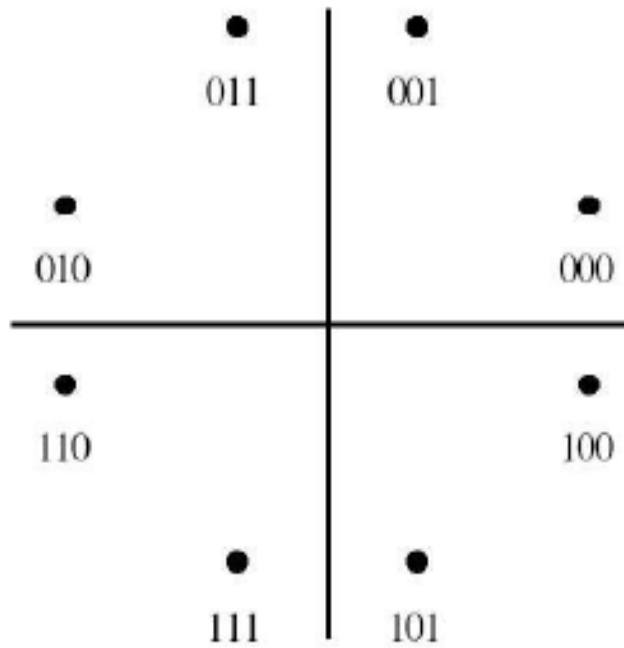


- *Frequency Shift Keying*
- M-FSK
- Varia a frequência da portadora entre  $M$  valores
- BFSK
- *Binary* FSK
- Usa duas frequências ( $M = 2$ )

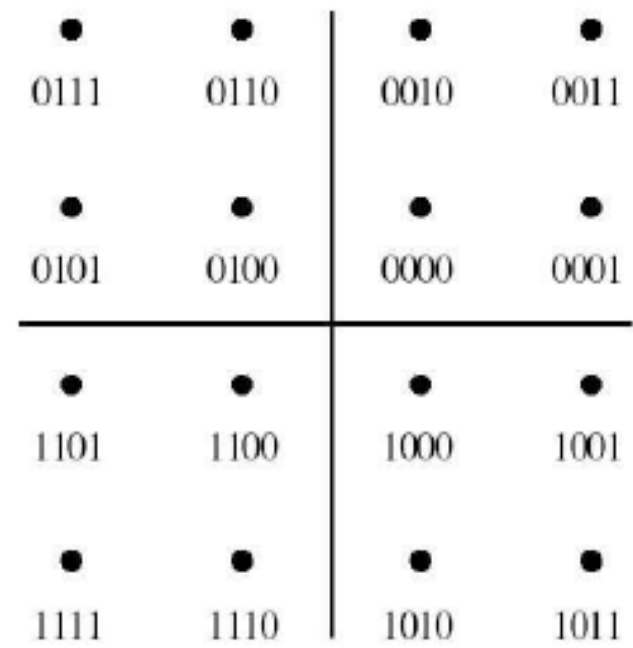


- *Quadrature Amplitude Modulation*
- M-QAM
- Pode variar a amplitude e a fase da portadora entre  $M$  valores
- Quanto maior o número de símbolos, maior a probabilidade de ocorrerem erros
  - Em função do ruído e da atenuação
    - Torna-se difícil a distinção entre os símbolos
- QAM usada no IEEE 802.11 e no IEEE 802.16

# QAM



8-QAM



16-QAM

# Outras Técnicas de Transmissão

- Podem ser usadas junto com as modulações
- Espalhamento de espectro
- Modulação por divisão de frequências ortogonais

# Espalhamento de Espectro

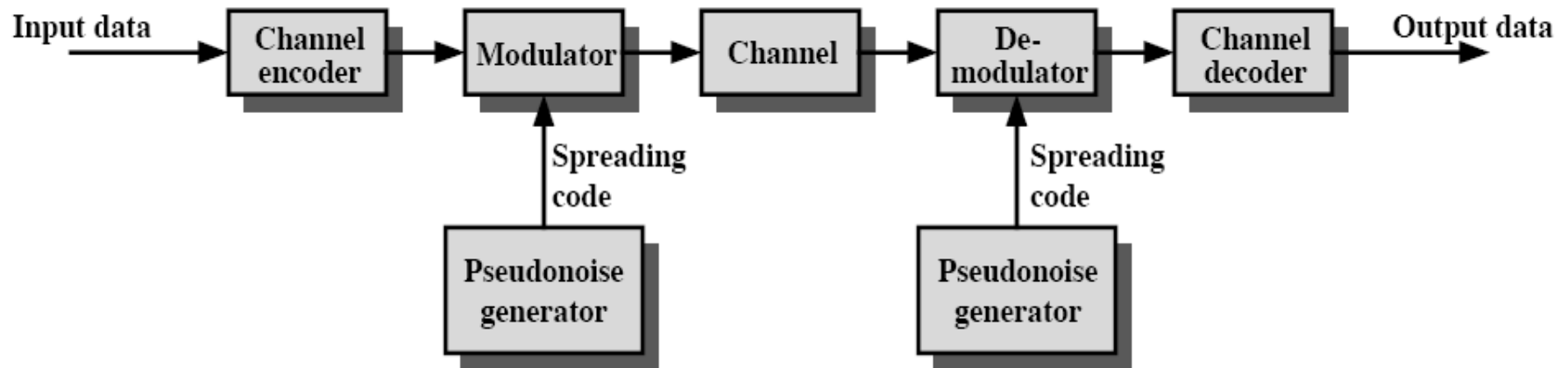
- *Spread Spectrum*
- Espalham um sinal em uma largura de banda superior à exigida pelo sinal original
- Objetivo
  - Minimizar o efeito da interferência em frequências específicas
  - Minimizar o efeito da interferência causada por múltiplos caminhos
- Custo
  - Desperdício de banda

# Espalhamento de Espectro

- Ineficiente quanto à utilização da banda para um usuário
- Vantagem
  - Permite que vários usuários usem simultaneamente a mesma banda sem interferências significativas entre eles → torna-se eficiente em termos de banda
- Usam sequências pseudo-aleatórias
  - Parecem aleatórias
  - Podem ser reproduzidas pelos receptores

# Espalhamento de Espectro

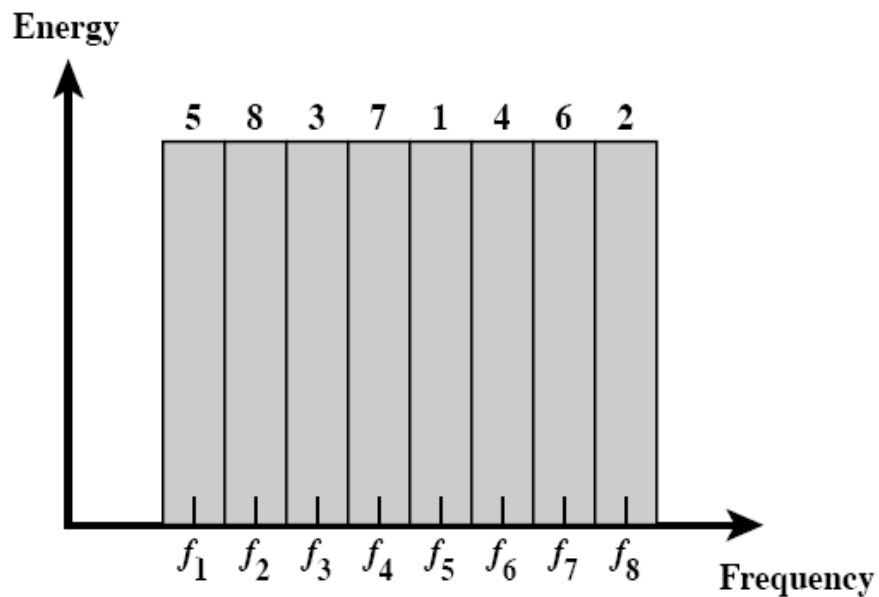
Modelo geral de espalhamento de espectro (fonte: Stallings)



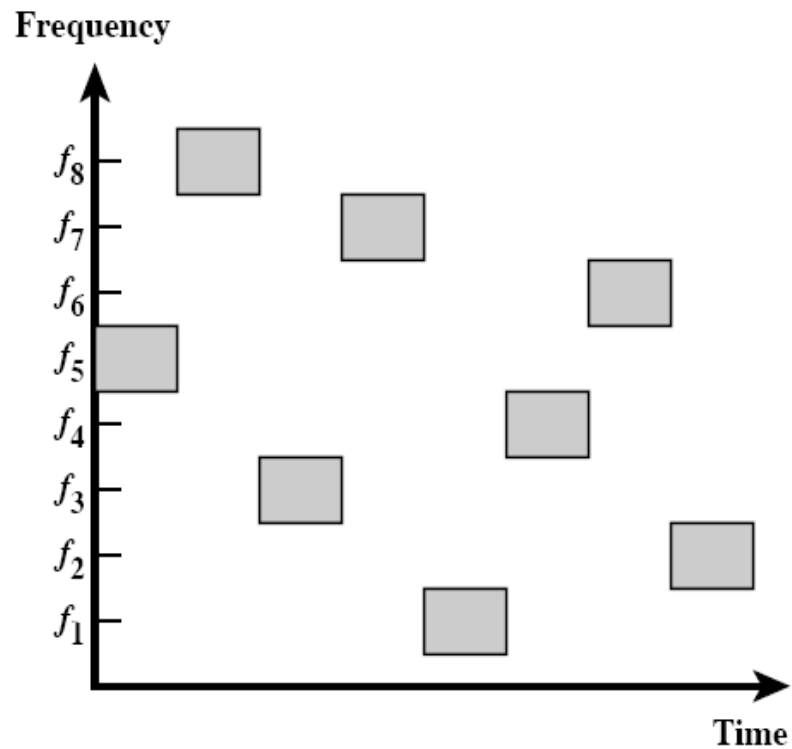
# Espalhamento de Espectro

- Dois tipos
  - Espalhamento de espectro por saltos de frequência
  - Espalhamento de espectro por sequência direta

- *Frequency Hopping Spread Spectrum*
- Utiliza saltos de frequência para implementar o espalhamento
- Usa uma modulação com uma portadora que salta de frequência em frequência em função do tempo
- Transmissor e receptor ficam em cada um desses canais por um certo tempo e saltam para outro canal



(a) Channel assignment



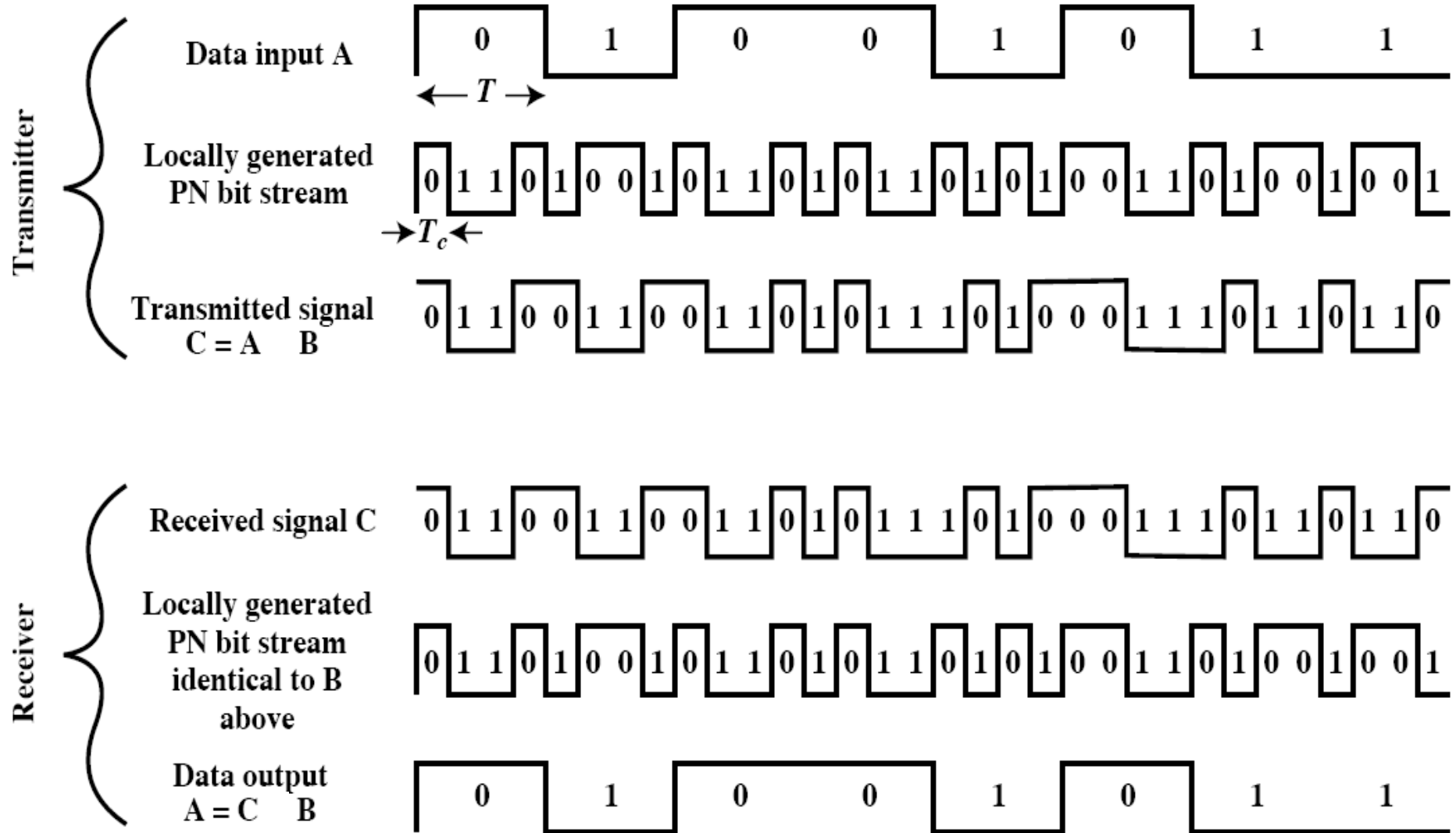
(b) Channel use

fonte: Stallings

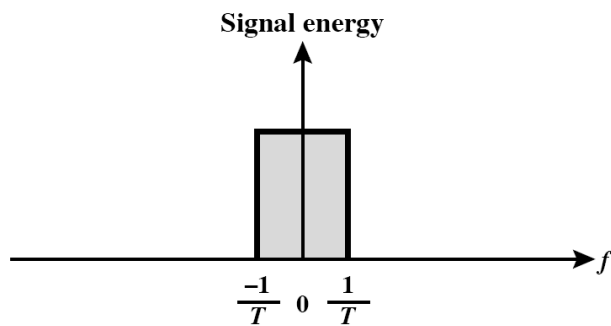
- Permite a coexistência de várias redes em uma mesma área
  - Através do uso de diferentes padrões pseudo-aleatórios chamados sequências de saltos
- Usado no Bluetooth e nas primeiras versões do IEEE 802.11

- *Direct Sequence Spread Spectrum*
- Consiste na multiplicação do sinal por uma sequência pseudo-aleatória com taxa de transmissão bem maior
- Geralmente é realizado um XOR dos dados com a sequência binária
  - Bit
    - 0 → sequência
    - 1 → complemento da sequência

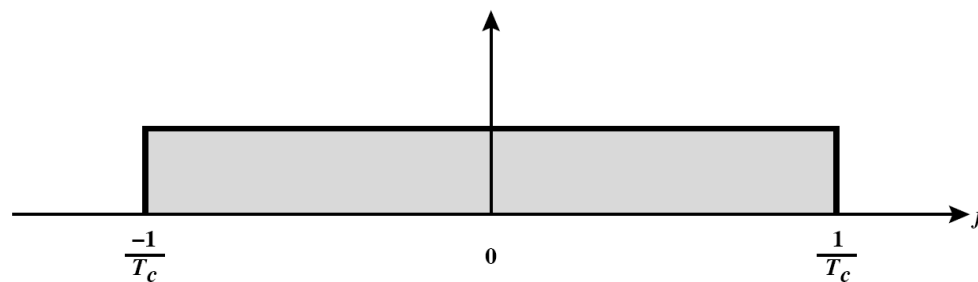
# Exemplo de DSSS (fonte: Stallings)



- Número de bits da sequência (fator de espalhamento) determina a banda passante do sinal resultante
- Usado no IEEE 802.11



(a) Spectrum of data signal

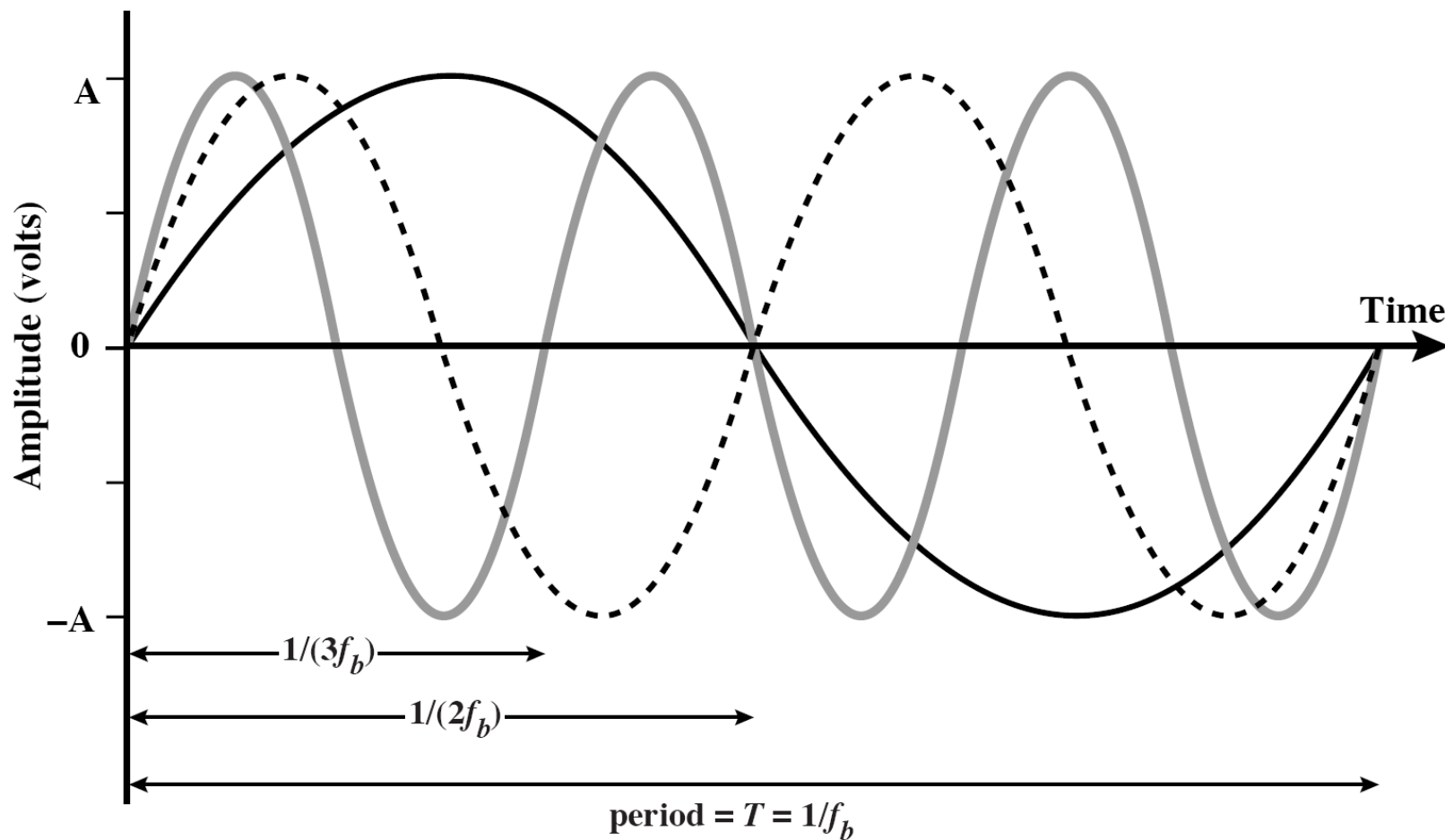


(b) Spectrum of pseudonoise signal

- *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
- Divide o espectro em múltiplas sub-bandas de frequências bem estreitas
  - Envia alguns bits em cada sub-banda
- Todas as sub-bandas são dedicadas a uma única fonte
  - Diferentemente do FDM

- Efeito de espalhamento de espectro é similar às outras técnicas
  - Sinal usa diversas frequências
  - Espalhamento em bandas estreitas
    - Maior eficiência espectral
    - Maior imunidade à interferência de frequências específicas
    - Permite não usar canais onde a interferência é alta
- Subportadoras chegam a se sobrepor
  - Subportadoras ortogonais
    - Centradas nos zeros das subportadoras adjacentes

# OFDM



(a) Three subcarriers in time domain

fonte: Stallings

- Maior imunidade a ruídos e interferências
  - Subportadoras são independentes
  - Pode-se descartar uma ou mais subportadoras e utilizar as restantes para a transmissão dos dados
- Usado no IEEE 802.11 e no IEEE 802.16

# IEEE 802.11: Camada Física

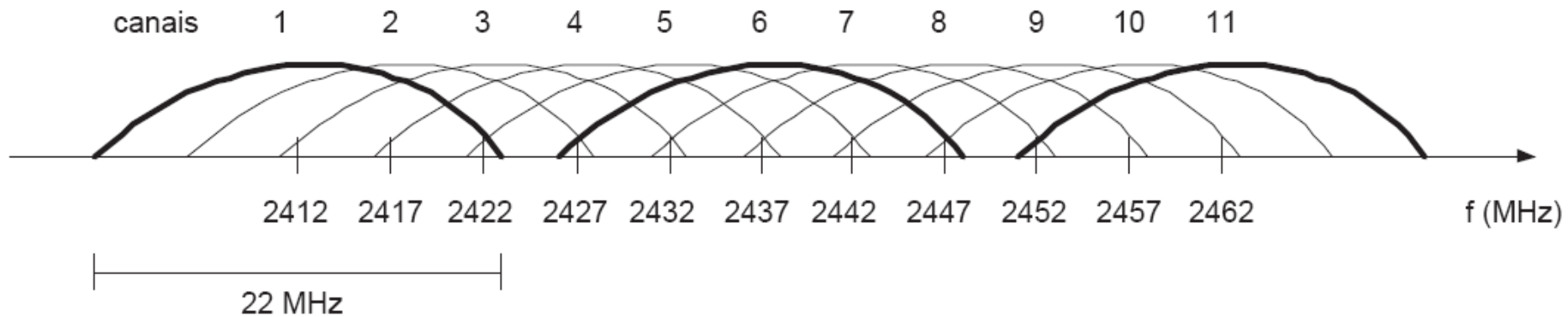
- Criadas diversas extensões da norma
  - Modificam a camada física do padrão original
    - Extensões propostas em documentos separados
      - Alteram partes do padrão IEEE 802.11 de 1999 e introduzem novas funcionalidades
- Camada composta por duas subcamadas
  - Subcamada de convergência
    - *Physical Layer Convergence Procedure* (PLCP)
  - Subcamada dependente do meio físico (PMD)

# Camada Física - PMD

- Uso da banda ISM nas faixas de 2,4 e 5 GHz
  - *Industrial, Scientific, and Medical*
  - Exceto para infravermelho
  - Não exige licenciamento
  - Disponível no mundo todo
  - Problemas de interferência em 2,4 GHz
    - Portões de garagem
    - Telefones sem fio
    - Fornos de microondas

- Técnicas de transmissão
  - Infravermelho (802.11)
  - FHSS em 2,4 GHz (802.11)
  - DSSS em 2,4 GHz (802.11)
  - HR-DSSS (802.11b)
  - OFDM em 5 GHz (802.11a)
  - OFDM em 2,4 GHz (802.11g)

# Camada Física - IEEE 802.11g



- Diferentes procedimentos definidos para cada extensão do IEEE 802.11
- PPDU's
  - PDU's do PLCP
- Algumas extensões possuem PPDU's
  - Curtas
    - Aumento da eficiência
  - Longas
    - Manutenção da compatibilidade com os padrões anteriores
- Exemplos a seguir

- $SIFS = RxRFDelay + RxPLCPDelay + MACProcessingDelay + RxTxTurnaroundTime$ 
  - Tempo do fim do recebimento de um quadro ao começo do envio de outro
    - $RxRFDelay$  → tempo entre o fim do último símbolo e uma `PMD-DATA.indication`
    - $RxPLCPDelay$  → tempo para entregar dados ao MAC
    - $MACProcessingDelay$  → tempo para processar o quadro e preparar uma resposta
    - $RxTxTurnaroundTime$  → tempo máximo para trocar de recepção para transmissão

- $\text{SlotTime} = \text{CCATime} + \text{RxTxTurnaroundTime} + \text{AirPropagationTime} + \text{MACProcessingDelay}$ 
  - Tempo para o quadro ser escutado por todos em um mesmo *slot*
    - $\text{CCATime} \rightarrow$  tempo mínimo de detecção de portadora
    - $\text{RxTxTurnaroundTime} \rightarrow$  tempo máximo para trocar de recepção para transmissão
    - $\text{AirPropagationTime} \rightarrow$  tempo que o sinal leva do transmissor ao receptor
    - $\text{MACProcessingDelay} \rightarrow$  tempo para processar o quadro e preparar uma resposta
- $\text{DIFS} = \text{SIFSTime} + 2 \times \text{SlotTime}$
- $\text{PIFS} = \text{SIFSTime} + \text{SlotTime}$

# Temporizações

- Para o padrão IEEE 802.11

Intervalo	Duração ( $\mu\text{s}$ )
SIFS	10
PIFS	30
DIFS	50
EIFS	364

# IEEE 802.11n

- 2009
- Visa atingir 100 Mb/s na subcamada MAC
- Proposta do padrão aprovada em janeiro de 2006
  - Três grupos chamados TGn Sync, WWiSE e MITMOT apresentaram a proposta
- Introduz o conceito de múltiplas antenas

# IEEE 802.11n - MIMO

- *Multiple-Input Multiple-Output*
- Configuração  $M \times N$ 
  - $M$  antenas transmissoras
  - $N$  antenas receptoras
  - Pode chegar a  $4 \times 4$
- Aumenta a vazão através de
  - Multiplexação espacial
    - Fluxo pode ser quebrado e multiplexado em múltiplos fluxos espaciais

- Outras características (camada física)
  - Junção de canais
    - Na faixa de 5 GHz
    - Dois canais de 20 MHz formando 40 MHz
  - Número de subportadoras de dados
    - De 48 para 52
  - Quatro fluxos espaciais

- Taxas de transmissão são função de
  - Largura do canal
  - Modulação
  - Taxa de código
  - Quantidade de fluxos espaciais
    - Depende do número de antenas
  - Intervalo de guarda
- Outras características (subcamada MAC)
  - Agregação de quadros em um quadro físico
  - QoS baseada no IEEE 802.11e

# IEEE 802.11ac

- Finalizado em 2013
- Taxas de até 1 Gb/s
  - Extensão lançada em 2014 possibilita até 7 Gb/s
- Também usa MIMO
  - 8 fluxos espaciais contra 4 do IEEE 802.11n
- Canais de 80 ou 160 MHz
- Modulação 256-QAM
  - Contra 64-QAM do IEEE 802.11n

**Aulas 8 e 9**

# **Redes Sem-Fio e Mobilidade**

**O padrão IEEE 802.11**

Igor Monteiro Moraes  
Redes de Computadores II