

CPE710: Redes Móveis

Prof. Miguel Elias Mitre Campista

`http://www.gta.ufrj.br/~miguel`

CPE710: Redes Móveis

PADRÃO IEEE 802.11

Padrão IEEE 802.11

- Criação de vários tipos de redes sem-fio
 - Desejo de ligar 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

- 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*)

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

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

Padrão IEEE 802.11

| | IEEE 802.11a | IEEE 802.11b | IEEE 802.11g | IEEE 802.11n | |
|----------------------------|------------------|----------------------------------|--|--|--|
| Data da aprovação | 07/1999 | 07/1999 | 06/2003 | 10/2009 | |
| Taxa de transmissão (Mbps) | 6, 9, 12, 18, 24 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 18, 24 | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54, 60, 66, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144, 156, 168, 180, 192, 200, 216, 225, 234, 240, 249, 252, 258, 270, 280, 288, 300, 312, 324, 336, 348, 360, 396, 420, 432, 440, 450, 468, 480, 490, 500, 510, 520, 540, 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610, 620, 630, 640, 650, 660, 670, 680, 690, 700, 710, 720, 730, 740, 750, 760, 770, 780, 790, 800, 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870, 880, 890, 900, 910, 920, 930, 940, 950, 960, 970, 980, 990, 1000 | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54, 60, 66, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144, 156, 168, 180, 192, 200, 216, 225, 234, 240, 249, 252, 258, 270, 280, 288, 300, 312, 324, 336, 348, 360, 396, 420, 432, 440, 450, 468, 480, 490, 500, 510, 520, 540, 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610, 620, 630, 640, 650, 660, 670, 680, 690, 700, 710, 720, 730, 740, 750, 760, 770, 780, 790, 800, 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870, 880, 890, 900, 910, 920, 930, 940, 950, 960, 970, 980, 990, 1000 | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54, 60, 66, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144, 156, 168, 180, 192, 200, 216, 225, 234, 240, 249, 252, 258, 270, 280, 288, 300, 312, 324, 336, 348, 360, 396, 420, 432, 440, 450, 468, 480, 490, 500, 510, 520, 540, 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610, 620, 630, 640, 650, 660, 670, 680, 690, 700, 710, 720, 730, 740, 750, 760, 770, 780, 790, 800, 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870, 880, 890, 900, 910, 920, 930, 940, 950, 960, 970, 980, 990, 1000 |
| Modulação | OFDM | DSSS, CCK | DSSS, CCK, OFDM | DSSS, CCK, OFDM | |
| Largura do canal (MHz) | 20 | 20 | 20 | 20 ou 40 | |

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

IEEE 802.11: Camada MAC

- Acesso múltiplo
 - Estações associadas aos APs ou em uma rede *ad hoc* podem tentar acessar o meio ao mesmo instante...

Como coordená-las?

IEEE 802.11: Camada MAC

- Acesso múltiplo
 - Estações associadas aos APs ou em uma rede *ad hoc* podem tentar acessar o meio ao mesmo instante...

Como coordená-las?

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

Recordando...o que é necessário para se detectar colisões em redes sem fio?

IEEE 802.11: Camada MAC

- **Para detectar colisões...**
 - É necessário enviar e receber um sinal ao mesmo tempo, entretanto:
 - Potência de transmissão pode ser muito maior que a de recepção
 - Alto custo para desenvolvimento de 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 ainda assim existam colisões por problemas relativos a terminal escondido e desvanecimento

IEEE 802.11: Camada MAC

- Para detectar colisões...
 - É necessário enviar e receber um sinal ao mesmo tempo, entretanto:

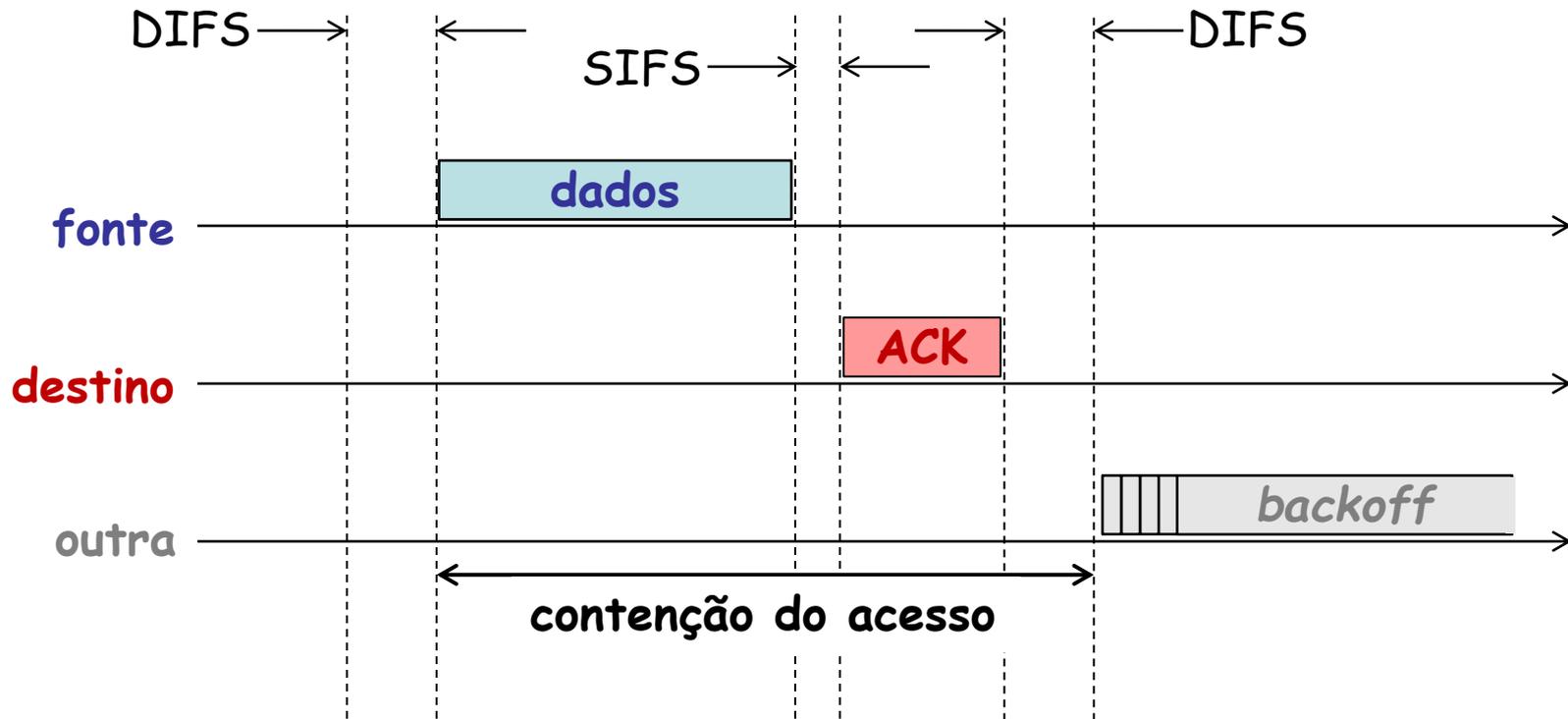
**O IEEE 802.11 usa o CSMA/CA
(Carrier Sense Multiple Access with
Collision Avoidance)**

- Mesmo com uma interface de rede capaz de transmitir e receber ao mesmo tempo...
 - É possível que ainda assim existam colisões por problemas relativos a terminal escondido e desvanecimento

IEEE 802.11: Camada MAC

- Dois mecanismos de acesso ao meio:
 - DCF (*Distributed Coordination Function*)
 - Distribuído
 - Modo básico: CSMA/CA
 - Modo com RTS/CTS: CSMA/CA + RTS/CTS
 - Modo mandatório
 - PCF (*Point Coordination Function*)
 - Centralizado
 - Ponto de acesso controla o acesso ao meio (rede infraestruturada)
 - Modo opcional e, portanto, pouco implementado

DCF Modo Básico



DCF Modo Básico

- Intervalos entre quadros
 - DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*)
 - Intervalo para o início de uma transmissão de um quadro
 - SIFS (*Short Inter-Frame Space*)
 - Intervalo entre quadro de dados e o ACK de uma mesma transmissão

DIFS precisa ser maior que SIFS ?

DCF Modo Básico

- Intervalos entre quadros
 - DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*)
 - Intervalo para o início de uma transmissão de um quadro
 - SIFS (*Short Inter-Frame Space*)
 - Intervalo entre quadro de dados e o ACK de uma mesma transmissão

SIM! O ACK deve ter maior prioridade de acesso ao meio que um quadro de dados. Caso um quadro de dados colida com um ACK, a transmissão torna-se mal sucedida

DCF Modo Básico

- Sobre os temporizadores...

$$\text{SIFS} = \text{RxRFDelay} + \text{RxPLCPDelay} + \text{MACProcessingDelay} + \text{RxTxTurnaroundTime}$$

- Tempo entre o fim do recebimento de um quadro e começo do envio do próximo
 - **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

DCF Modo Básico

- Sobre os temporizadores...

$$\text{SlotTime} = \text{CCATime} + \text{RxTxTurnaroundTime} + \text{AirPropagationTime} + \text{MACProcessingDelay}$$

- Tempo para o quadro ser escutado por todos em um mesmo *slot*
 - **CCATime**: tempo mínimo de detecção de portadora
 - **RxTxTurnaroundTime**: tempo máximo para trocar de recepção para transmissão
 - **AirPropagationTime**: tempo (máximo) que o sinal leva do transmissor ao receptor
 - **MACProcessingDelay**: tempo para processar o quadro e preparar uma resposta

DCF Modo Básico

- Sobre os temporizadores...
 - $DIFS = SIFSTime + 2 \times SlotTime$
 - $PIFS = SIFSTime + SlotTime$

DCF Modo Básico

- *Backoff Exponencial Binário (Binary Exponential Backoff - BEB)*
 - **Backoff Time = Random() × SlotTime**
 - **Random():** Sorteia um inteiro no intervalo $[0, CW]$
 - CW é a janela de contenção (*Contention Window*)
 - $CW_{\min} \leq CW \leq CW_{\max}$
 - **SlotTime:** Intervalo de tempo definido a partir de características da camada física
 - Garante que todos os nós da rede conseguem escutar portadora mesmo considerando atrasos de propagação

DCF Modo Básico

- **Backoff Time** é um temporizador aleatório
 - A cada **SlotTime** em que o meio estiver livre:
 - **Backoff time** é decrementado de um (1) **SlotTime**
 - Caso o **Backoff time** chegue a zero:
 - O quadro é transmitido
 - Porém, caso haja uma transmissão enquanto o **Backoff Time** for maior que 0
 - **Backoff Time** é congelado
 - Caso o contador tenha sido congelado e o meio voltar a ficar livre por DIFS
 - **Backoff Time** é descongelado com o mesmo valor anterior

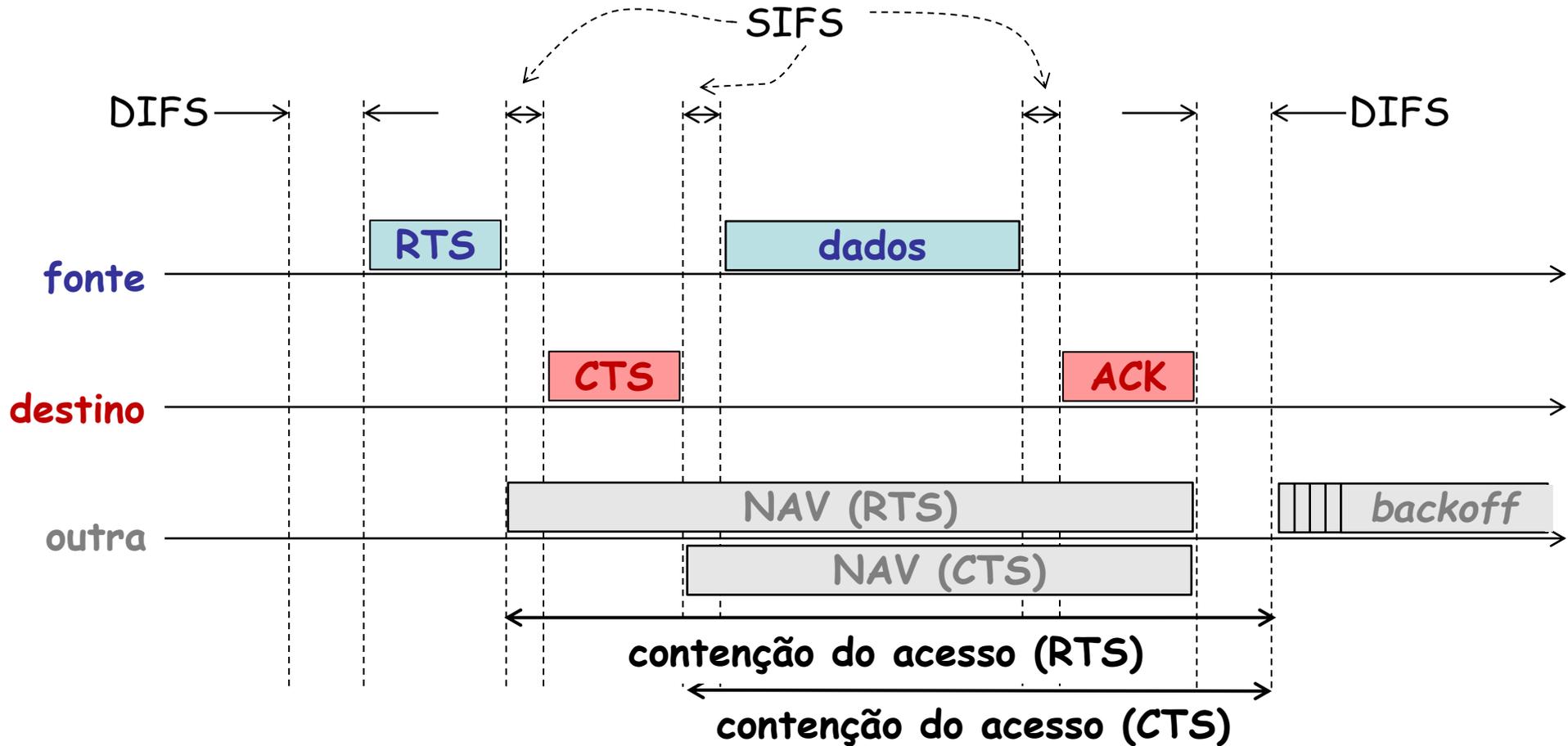
DCF Modo Básico

- **ACK não recebido**
 - Considera-se que houve uma colisão e que o quadro deve ser retransmitido
 - Valor de CW começa com o valor mínimo e é incrementado a cada transmissão mal sucedida
 - $CW = ((CW_{\min} + 1) * 2^{c-1}) - 1$, onde c é o número da próxima tentativa de transmissão
 - $\text{Random}()$ entre $[0, \min(CW, CW_{\max})]$
- **ACK recebido**
 - CW é reinicializado com o seu valor mínimo
 - $CW = CW_{\min}$

DCF Modo Básico

- Valores de CW_{\min} e CW_{\max} dependem da camada física
 - CW na tentativa de acesso c é o dobro do tamanho usado na tentativa $c - 1$
 - Em $c - 1$: $[0, CW_{c-1}]$
 - Em c : $[0, 2*(CW_{c-1} + 1) - 1]$
 - No padrão... $CW_{\min} = 15$ e $CW_{\max} = 1023$

DCF com RTS/CTS



DCF com RTS/CTS

- Intervalos entre quadros
 - DIFS: Mesmo papel que no modo básico
 - SIFS: Mesmo papel que no modo básico
 - Porém, é necessário SIFS também entre RTS e CTS e entre CTS e dados da mesma transmissão

CTS e quadros devem ter maior prioridade de acesso ao meio que um quadro de outro nó...

DCF com RTS/CTS

- Escuta de portadora no IEEE 802.11:
 - Física
 - Verifica a presença de sinal no meio
 - Virtual
 - Verifica registro lógico baseado no NAV (*Network Allocation Vector*)
 - Todo o quadro possui um campo NAV para indicar o tempo necessário até o término da sua própria comunicação
 - Nós que escutaram o NAV de um quadro nem precisam escutar mais o meio durante o período indicado
 - NAV é calculado a partir do tempo em microssegundos em que o meio estará ocupado

DCF com RTS/CTS

- NAV pode assumir os seguintes valores:
 - Quando em um quadro RTS
 - $NAV = \text{tempo CTS} + \text{SIFS} + \text{tempo dados} + \text{SIFS} + \text{tempo ACK}$
 - Quando em um quadro CTS
 - $NAV = \text{tempo dados} + \text{SIFS} + \text{tempo ACK}$
 - Quando em um quadro de dados
 - $NAV = \text{SIFS} + \text{tempo ACK}$
- Duração do NAV no CTS, no quadro de dados e no ACK
 - Soma dos IFS e do tempo para tx de cada quadro
 - $\text{tamanho_do_quadro} / \text{taxa_de_transmissão}$

DCF com RTS/CTS

- Número de retransmissões é limitado
 - 7 tentativas com RTS/CTS (dot11ShortRetryLimit)
 - 4 sem RTS/CTS (dot11LongRetryLimit)
 - Quadro é descartado considerando que as camadas superiores cuidam da perda
- Uso do RTS/CTS
 - A partir de quadros com 3000 Bytes de comprimento

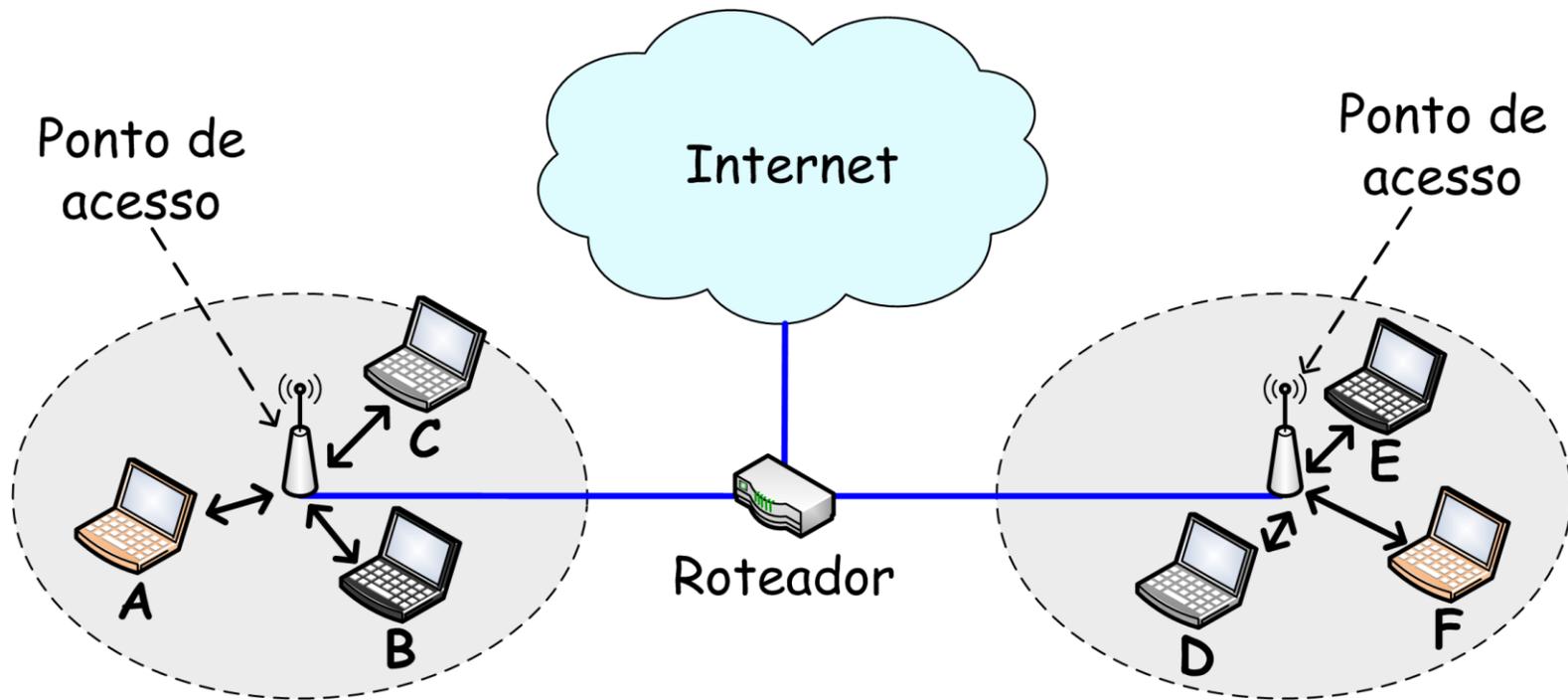
Operação do IEEE 802.11

- Divididos em dois modos de operação:
 - Redes infraestruturadas
 - Redes *ad hoc*

Redes Infraestruturadas

- Toda a comunicação é realizada através de um ponto de acesso
 - Exemplos
 - Redes celulares
 - Redes IEEE 802.11 com ponto de acesso

Redes Infraestruturadas

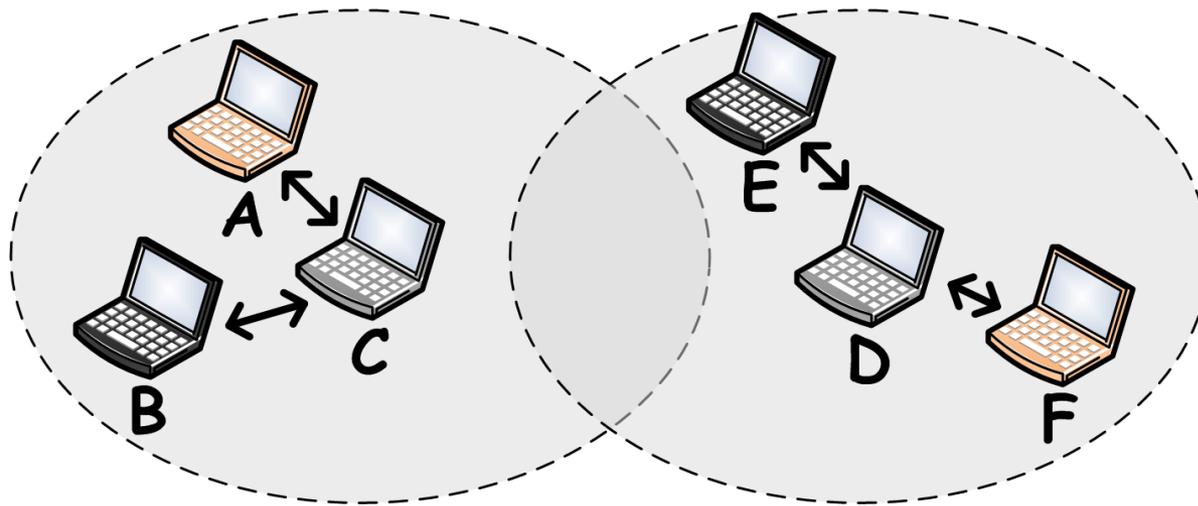


Redes Ad Hoc (ou Sem Infraestrutura)

- Não existem estações base
- Estações se comunicam diretamente
 - Nós só se comunicam com outros nós dentro do seu raio de alcance
- Dois tipos
 - Redes ad hoc de comunicação direta
 - Redes ad hoc de múltiplos saltos
 - Estações também se comportam como roteadores

Redes Ad Hoc (ou Sem Infraestrutura)

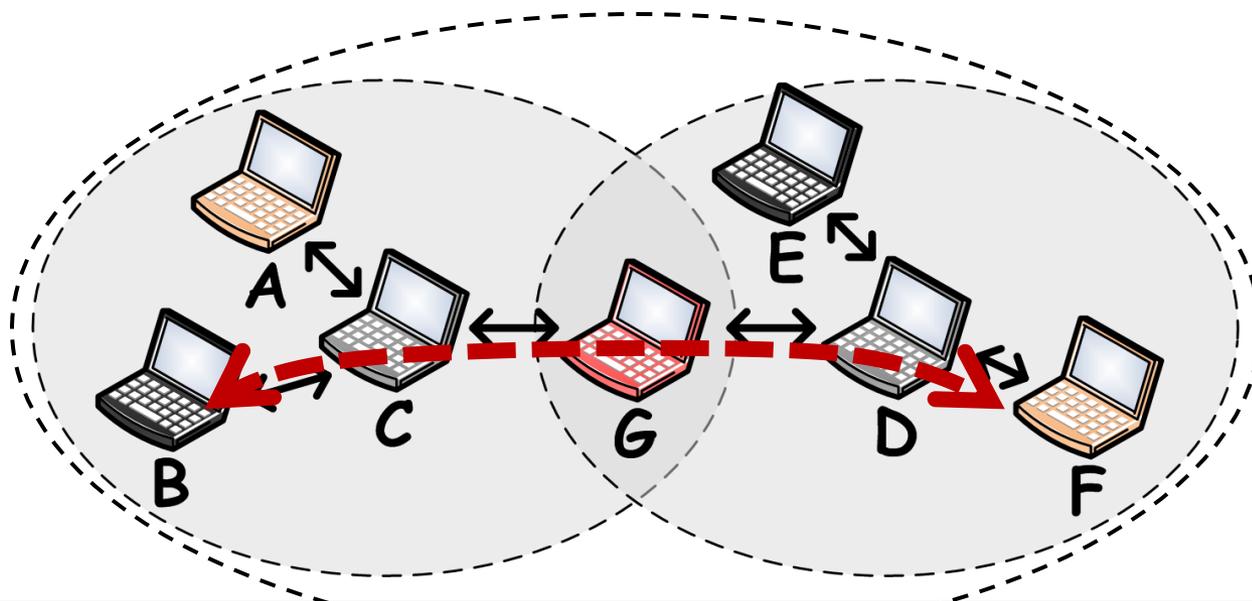
- Comunicação direta



Não há comunicações entre nós que não sejam vizinhos diretos!

Redes Ad Hoc (ou Sem Infraestrutura)

- Comunicação por múltiplos saltos



Comunicações são estabelecidas mesmo entre nós que não são vizinhos diretos!

Redes Ad Hoc (ou Sem Infraestrutura)

- Principais características
 - Auto-organização dinâmica
 - Topologia arbitrária e temporária
- Vantagens
 - Grande flexibilidade
 - Podem ser formadas em lugares ermos
 - Baixo custo de instalação
 - Robustez
 - Podem resistir a catástrofes da natureza e a situações de destruição por motivo de guerra

Redes Ad Hoc (ou Sem Infraestrutura)

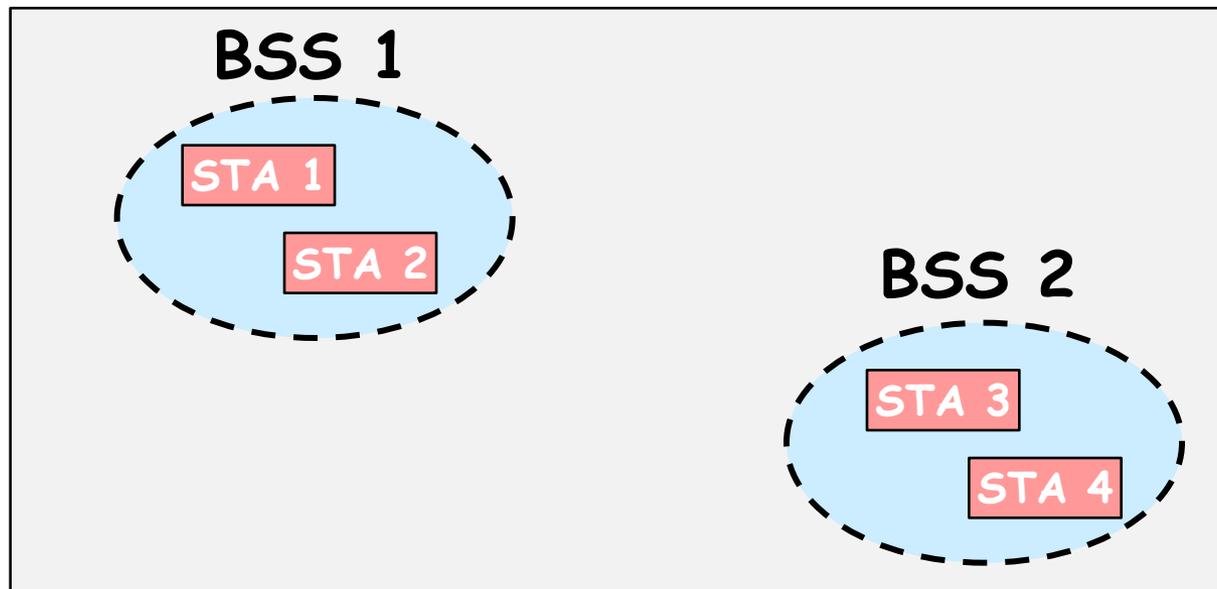
- Principais aplicações
 - Ambientes onde:
 - Não há infraestrutura
 - A infraestrutura existente não é confiável
 - Exemplos
 - Catástrofes
 - Guerra
 - Áreas rurais
 - Etc.

Taxonomia

| | Único Salto | Múltiplos Saltos |
|---------------------------------------|--|--|
| Infraestruturada | Estações se conectam à estação base que se conecta a uma rede cabeada/Internet | Estações atuam como roteadores e os pacotes tem que ser encaminhados por diferentes estações até uma rede cabeada/Internet |
| Ad hoc ou sem infraestruturada | Sem estação base e sem conexão com uma rede cabeada/Internet | Estações atuam como roteadores e os pacotes tem que ser encaminhados por diferentes estações até o destino |

Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- *Basic Service Set (BSS)*
 - Componente básico de uma WLAN IEEE 802.11 que denotam grupos de estações capazes de se comunicar

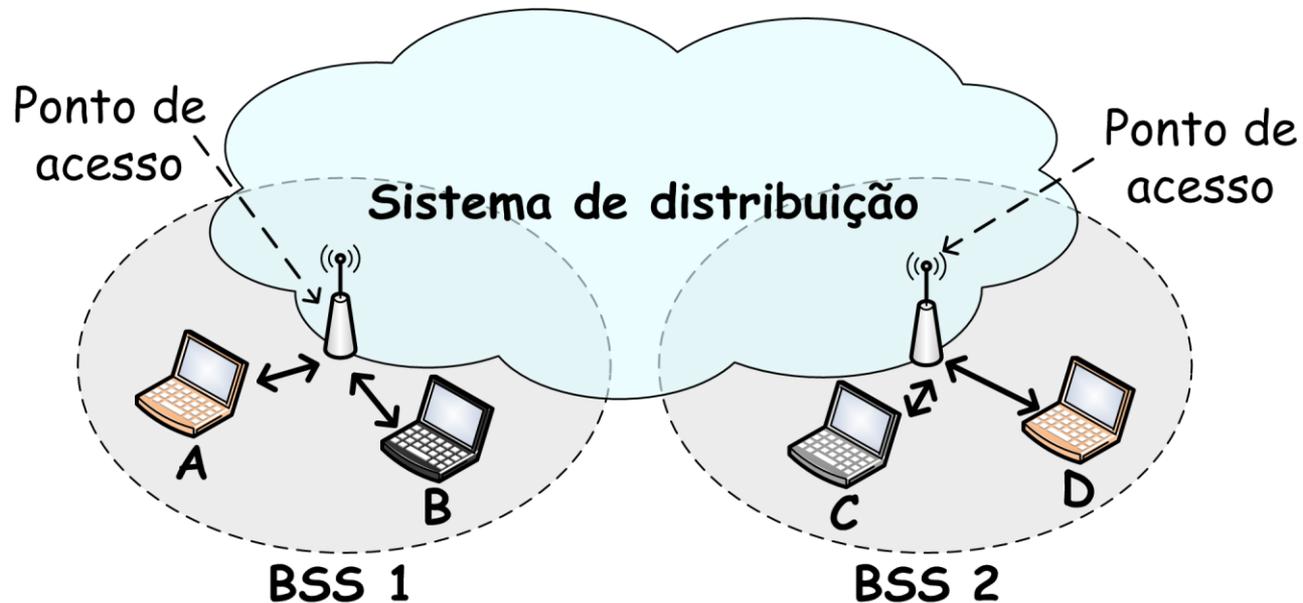


Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Redes Ad Hoc
 - Formam a *Independent BSS* (IBSS)
 - Tipo mais básico de WLAN IEEE 802.11
 - Possível quando as estações são capazes de se comunicar diretamente
- Redes Infraestruturadas
 - Formam a *Infrastructure BSS*
 - BSS é composta por estações e também por um ponto de acesso
 - Uma das estações passa a desempenhar o papel de ponto de acesso

Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Sistemas de distribuição
 - Componente da arquitetura que interconecta diferentes BSSs
 - Cada BSS pode ser visto como um componente de um BSS estendido

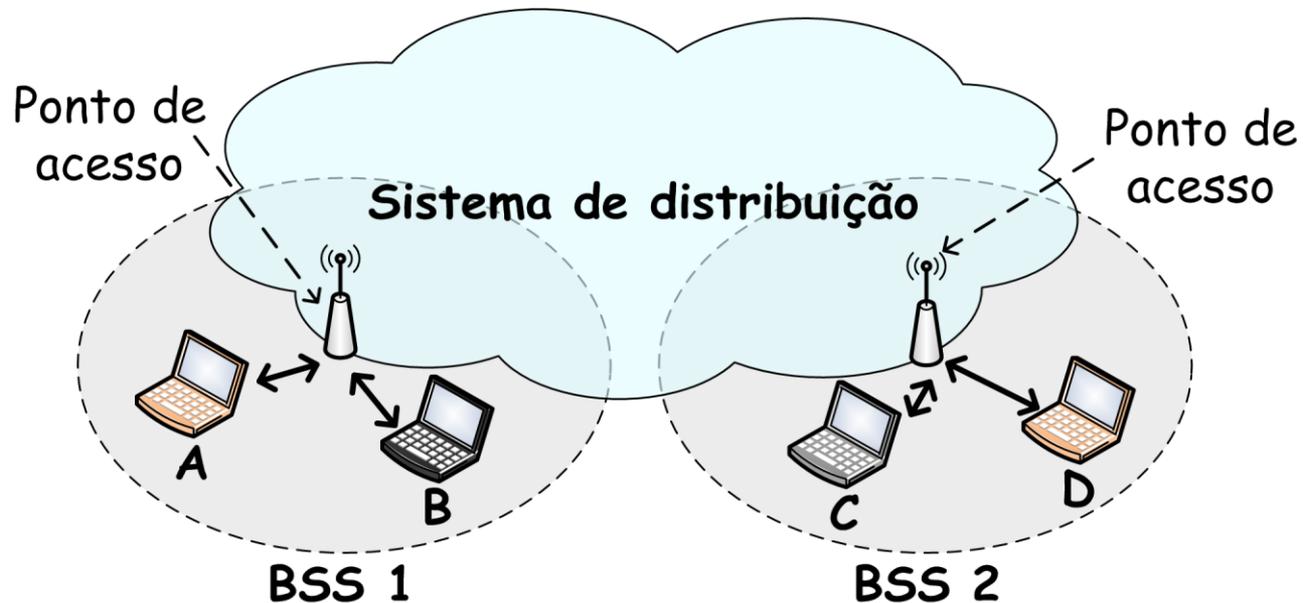


Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Sistemas de distribuição
 - Proveem suporte a dispositivos móveis
 - Oferecem serviços de mapeamento de endereços e integração transparente de múltiplos BSSs
 - Integram os múltiplos BSSs de forma transparente
- Pontos de acesso
 - Proveem acesso ao sistema de distribuição
 - Oferecem serviços de sistemas distribuídos e atuam como uma estação

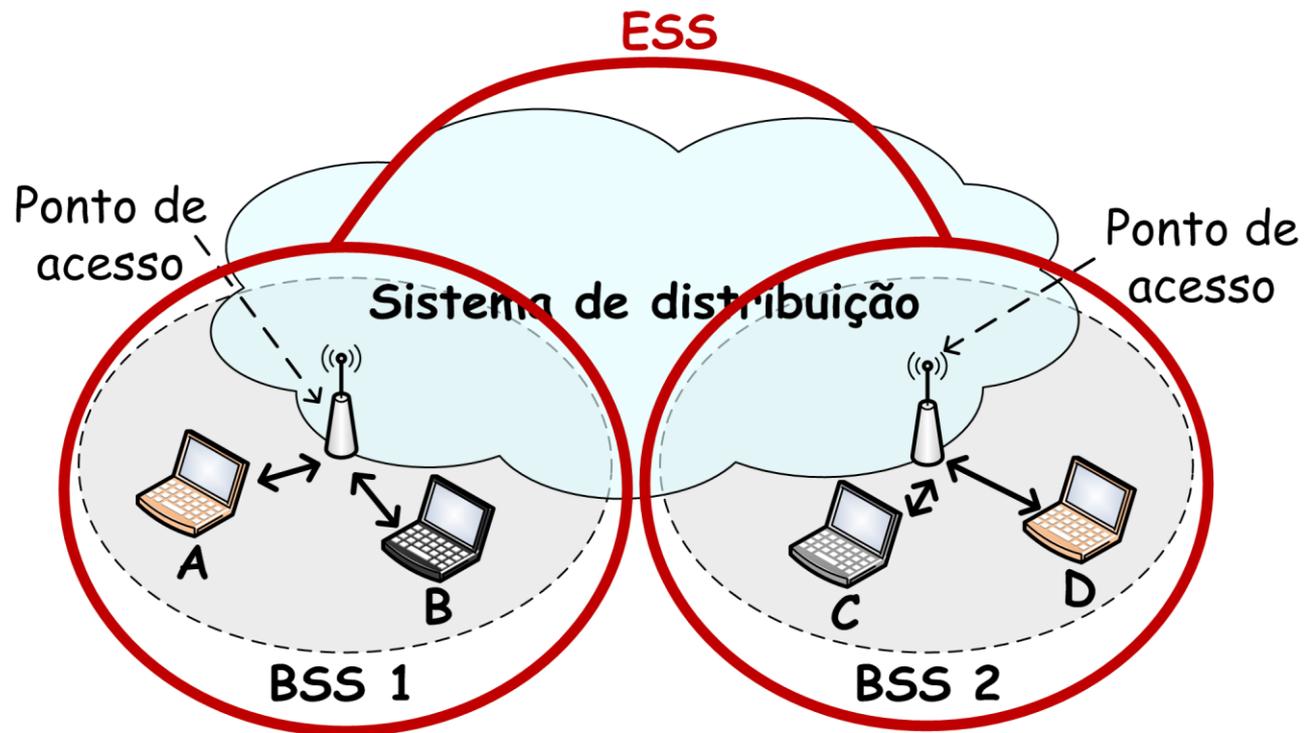
Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Dados se movem entre um BSS e o sistema de distribuição por um ponto de acesso
 - Ponto de acesso também é estação e por isso é endereçável (endereço da rede sem fio e do sistema de distribuição podem ser diferentes)



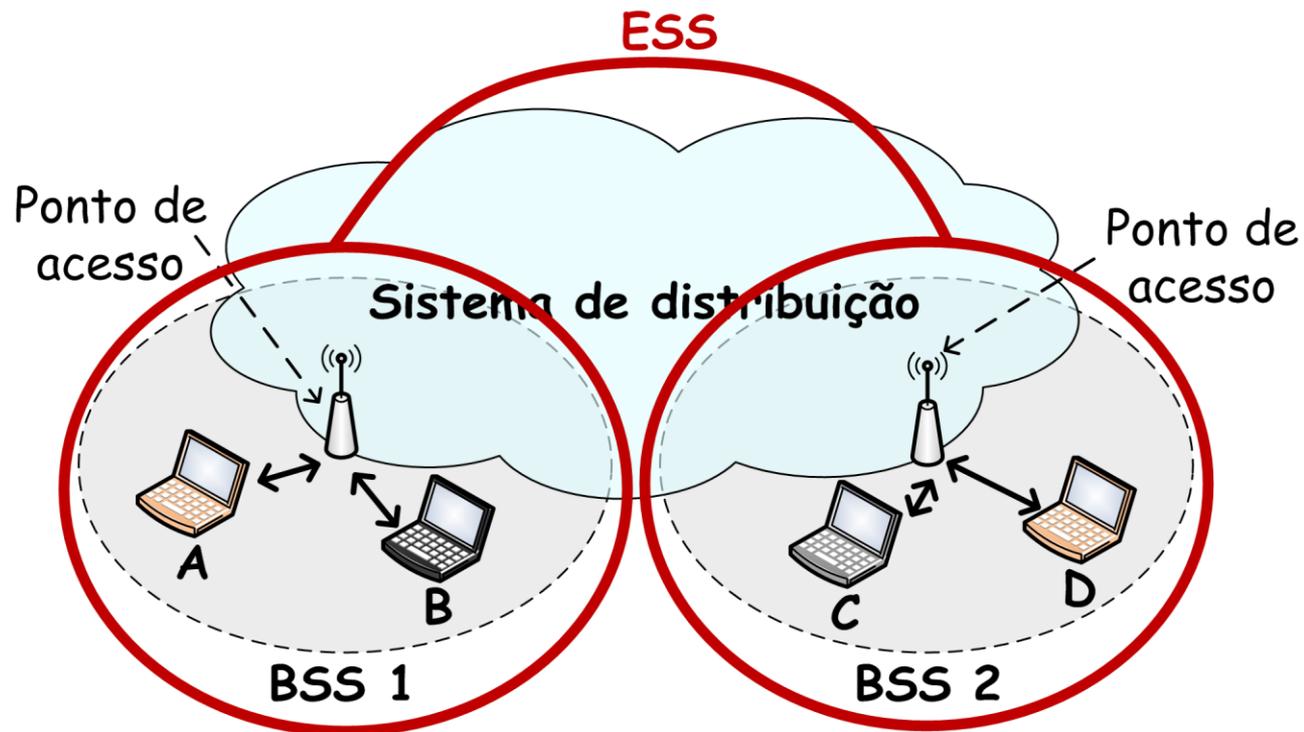
Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Sistemas de distribuição + BSSs
 - Permitem que o IEEE 802.11 crie redes sem fio de tamanho arbitrário - *Extended Service Set (ESS)*



Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- ESS aparece para a camada LLC como uma IBSS
 - Estações na mesma ESS podem se comunicar e se mover de uma BSS para outra dentro da mesma ESS



Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- BSSs podem se sobrepor parcialmente
 - Usado para garantir cobertura contínua
- BSSs podem estar separadas fisicamente
 - Não há limites lógicos para a distância entre BSSs
- BSSs podem estar localizadas no mesmo espaço físico
 - Para garantir redundância, por exemplo
- Um (ou mais) IBSS ou ESS podem estar presentes no mesmo espaço físico como uma (ou mais) redes ESS
 - Uma rede ad hoc pode ser necessária no mesmo espaço em que uma rede ESS pré-existente
 - Redes diferentes podem ter donos diferentes

Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- BSSs podem se sobrepor parcialmente
 - Usado para garantir cobertura contígua
- BSSs podem estar separadas fisicamente

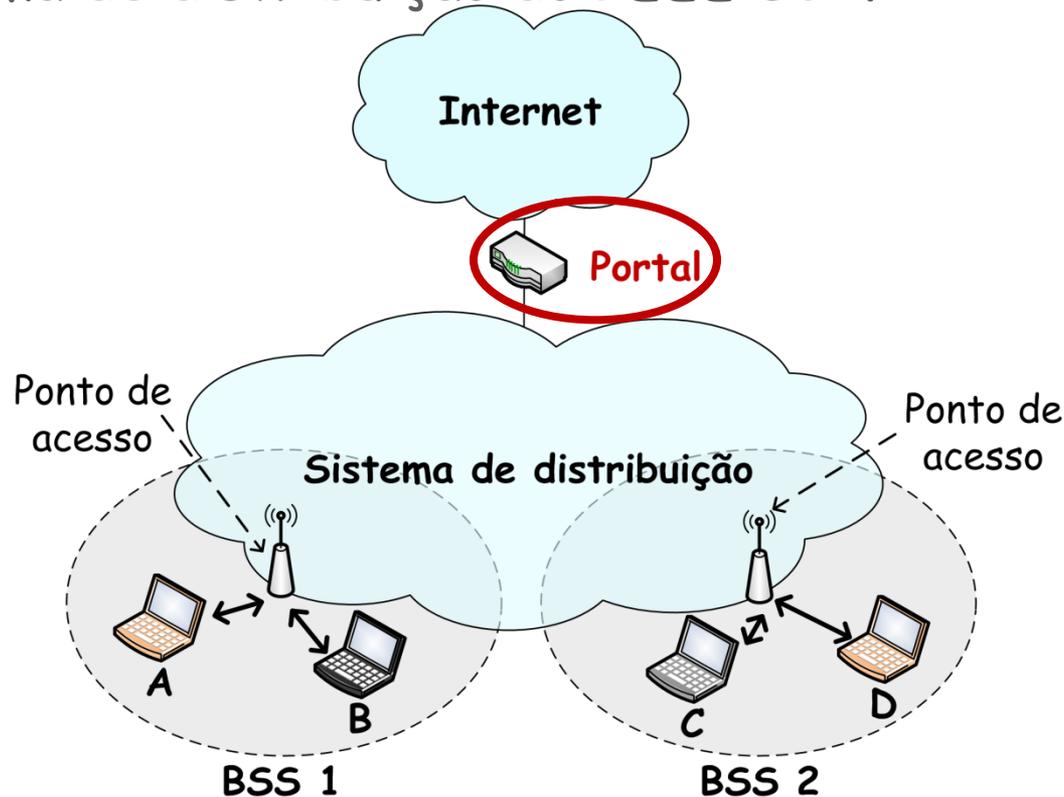
Limites das BSSs não são bem definidos pois dependem das características físicas do meio sem-fio

mesmo espaço físico como uma (ou mais) redes ESS

- Uma rede ad hoc pode ser necessária no mesmo espaço em que uma rede ESS pré-existente
- Redes diferentes podem ter donos diferentes

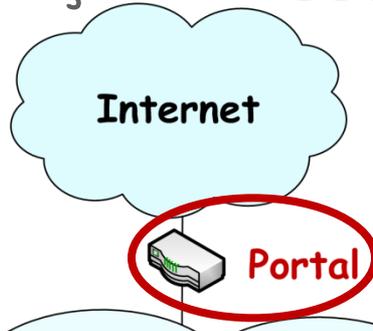
Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Portal: Integra o IEEE 802.11 com redes cabeadas
 - Interface entre uma rede não IEEE 802.11 com o sistema de distribuição do IEEE 802.11

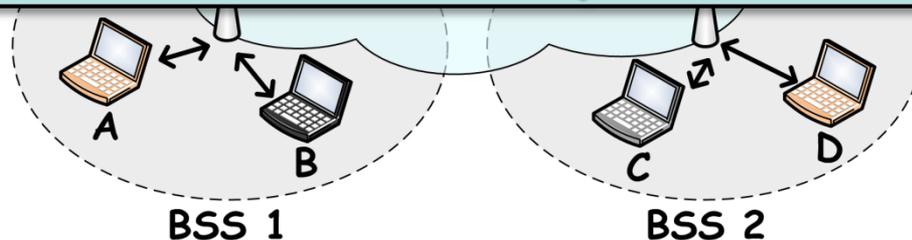


Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Portal: Integra o IEEE 802.11 com redes cabeadas
 - Interface entre uma rede não IEEE 802.11 com o sistema de distribuição do IEEE 802.11



**Ponto de acesso pode acumular a
função de portal**



Serviços da Arquitetura IEEE 802.11

- Padrão não define qual a tecnologia de rede deve ser usada no sistema de distribuição
 - Pode ser cabeado...
 - Ou ainda, pode ser cabeado e usar tecnologia diferente ao da rede de interconexão com outras redes
- Porém, padrão exige que os componentes da arquitetura desempenhem determinados **serviços**
 - Serviços são divididos entre serviços do sistema de distribuição e serviços das estações

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11

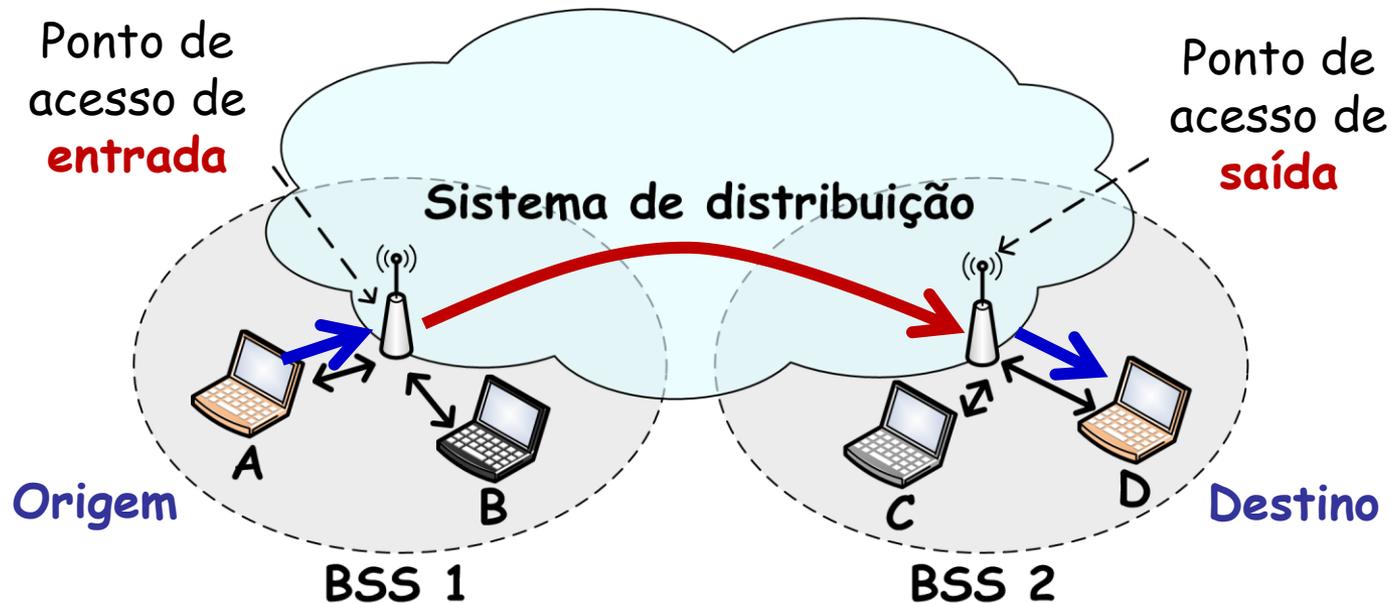
- Serviços dos sistemas de distribuição (*Distributed System Set - DSS*)
 - Distribuição
 - Integração
 - Associação
 - Reassociação
 - Desassociação
- Serviços das estações (*Station Set - SS*)
 - Autenticação
 - Desautenticação
 - Privacidade
 - Entrega do quadro

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11

- **Serviços das estações** são desempenhados por todas as estações IEEE 802.11
 - Inclusive os pontos de acesso que também são estações
- **Serviços do sistema de distribuição** são acessíveis através do ponto de acesso
 - Os serviços devem ser oferecidos por uma estação que também ofereça os serviços do sistema de distribuição
 - **Essa estação pode ser o ponto de acesso**

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- Distribuição
 - Sistema de distribuição é responsável por entregar os pacotes recebidos desde o ponto de acesso de origem até o de destino



Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- Distribuição
 - Sistema de distribuição é responsável por entregar os pacotes recebidos desde o ponto de acesso de origem até o de destino

Ponto de
acesso de
entrada

Ponto de
acesso de
saída

**Se estações de origem e destino
estiverem no mesmo BSS, então:
AP de origem = AP de saída**

Origem

B

C

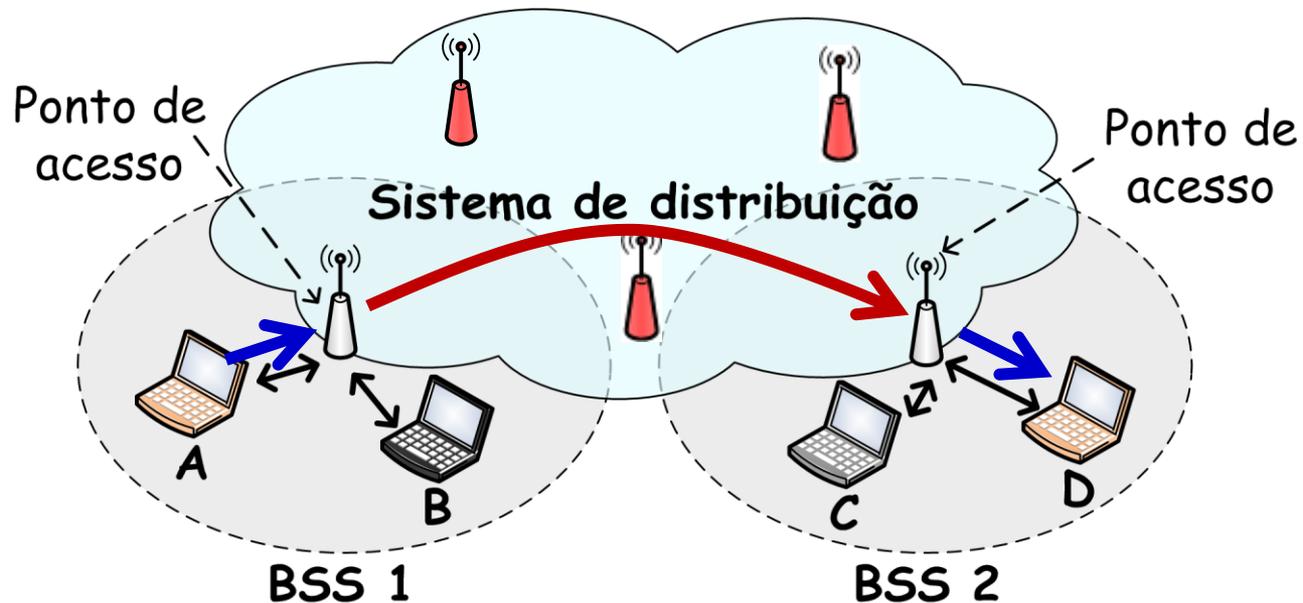
Destino

BSS 1

BSS 2

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- *Wireless Distribution System (WDS)*
 - Sistema de distribuição composto por pontos de acesso
 - Pontos de acesso podem apenas encaminhar quadros ou apenas oferecer acesso à Internet ou apenas oferecer acesso a usuários



Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- Integração
 - Sistema de distribuição determina se o recipiente de uma mensagem está ou não em uma rede externa
 - Nesse caso, o "AP de saída" é o portal
 - Sistema de distribuição é responsável por fazer o que for preciso para entregar a mensagem corretamente
 - Incluindo a tradução do meio e do espaço de nomes

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- Associação
 - Sistema de distribuição requer a associação entre ponto de acesso e estação
 - Estações devem se associar a um ponto de acesso para enviar e receber mensagens
 - Associação provê serviço de mapeamento entre estação e ponto de acesso
 - Sistema de distribuição usa a informação de associação para executar o serviço de distribuição

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- Associação
 - Sistema de distribuição requer a associação entre ponto de acesso e estação
 - Informações de mapeamento são armazenadas e gerenciadas pelo sistema de distribuição
 - Estações se associam a um único ponto de acesso por vez
 - Associações estabelecidas oferecem acesso ao sistema de distribuição através de um ponto de acesso

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- Associação
 - Sistema de distribuição requer a associação entre ponto de acesso e estação
 - Estações aprendem que os pontos de acesso estão presentes e, então, requisitam associação
 - Associação é sempre iniciada pela estação

Associação isoladamente oferece suporte à mobilidade interna ao BSS... Como se mover entre BSSs diferentes?

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- Reassociação
 - Necessária por questões de mobilidade
 - Serviço de reassociação é invocada quando uma estação muda BSS
 - Serviço de reassociação mantém o sistema de distribuição informado sobre o mapeamento entre ponto de acesso e estação
 - Estação pode mudar de um BSS para outro no mesmo ESS
 - Reassociação é também sempre iniciada pela estação

Serviços da Arquitetura

IEEE 802.11 - DSS

- Desassociação
 - Invocada sempre que uma associação é terminada
 - Permite que o sistema de distribuição remova o mapeamento entre ponto de acesso e estação
 - Evita que quadros sejam enviados a estações desassociadas
 - Notificação que pode ser enviada tanto pelo ponto de acesso quanto pela estação
 - Desassociação não pode ser recusada
 - Não é pré-requisito para saída da rede
 - Desassociação pode falhar

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - SS

- Características intrínsecas do meio físico cabeado:
 - Possui confinamento e acesso controlado por natureza

Como conseguir as mesmas características nas redes sem-fio?

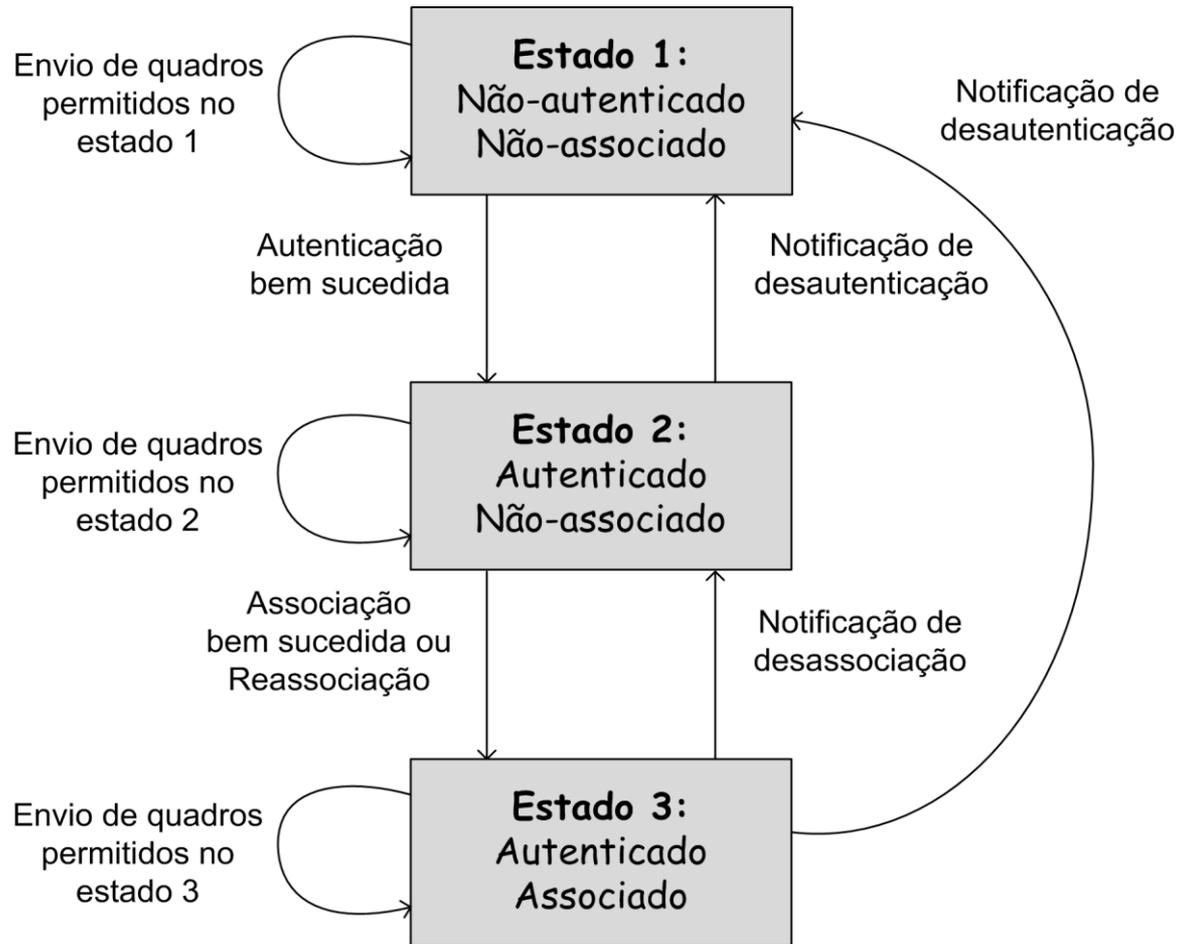
Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - SS

- Através de serviços de autenticação e privacidade!
 - Autenticação
 - **Pré-requisito da associação!**
 - IEEE 802.11 suporta vários processos de autenticação
 - Não há porém nenhum processo mandatório
 - **Desautenticação** pode levar uma estação à desassociação
 - Privacidade
 - IEEE 802.11 especifica algoritmos de privacidade opcionais
 - Por padrão, o WEP (*Wired Equivalent Privacy*) é especificado, devendo oferecer o mesmo nível de privacidade que uma rede cabeada

Relação entre Serviços

- Estações mantêm **duas** variáveis que definem o estado das comunicações de uma estação no meio sem-fio
 - Estado de autenticação:
 - Valores: não-autenticado e autenticado
 - Estado de associação:
 - Valores: não-associado e associado
- Essas duas variáveis possibilitam a definição de três estados para cada estação:
 - Estado 1: Estado inicial, não-autenticado, não-associado
 - Estado 2: Autenticado, não associado
 - Estado 3: Autenticado e associado

Relação entre Serviços



Diferenças entre ESS e IBSS

- IBSS estão ligadas a redes ad hoc
 - Consiste em estações que estão diretamente conectadas
 - Portanto, existe apenas um BSS
 - Como não há um sistema de distribuição...
 - Não há um portal
 - Não há uma rede cabeada integrada
 - Não há serviços de um sistema de distribuição (DSSs)
 - Somente os serviços de estação (SS) existem!
 - Pode ter um número arbitrário de estações

Quadros do IEEE 802.11

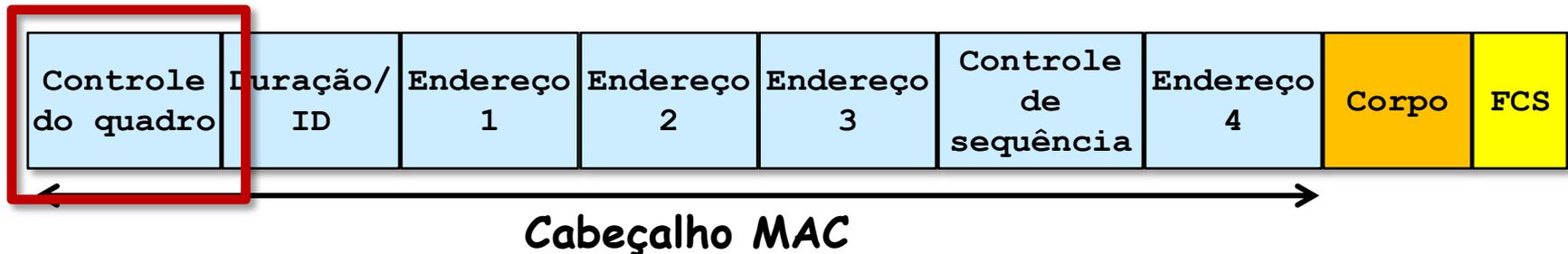
- Transmitido em taxa variável
 - Dados
- Transmitidos em uma taxa básica
 - RTS
 - CTS
 - ACK

Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- Todas as estações devem ser capazes de...
 - Construir quadros para a transmissão
 - Decodificar quadros a partir da recepção
- Cada quadro é composto por 3 componentes básicos:
 - **Cabeçalho:** Contém controle do quadro, duração, endereço e informação de controle de sequência
 - **Corpo:** Campo de comprimento variável que contém informações específicas, referentes ao tipo do quadro
 - **FCS (Frame Check Sequence):** Contém CRC (*Cyclic Redundancy Code*) de 32 bits

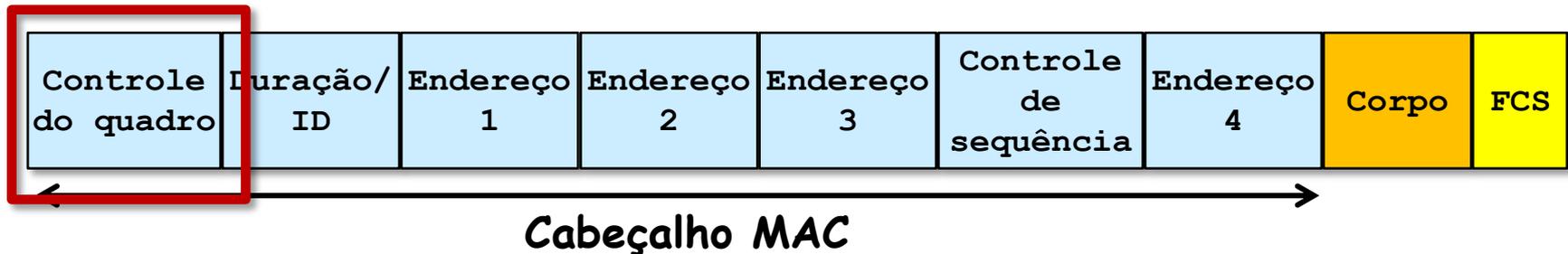
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- Controle de quadro (2 Bytes)
 - Subdividido em 11 campos
 - Versão (2 bits)
 - Versão inicial é número 0
 - Tipo (2 bits)
 - Dados, controle, gerenciamento
 - Subtipo (4 bits)
 - Função do quadro



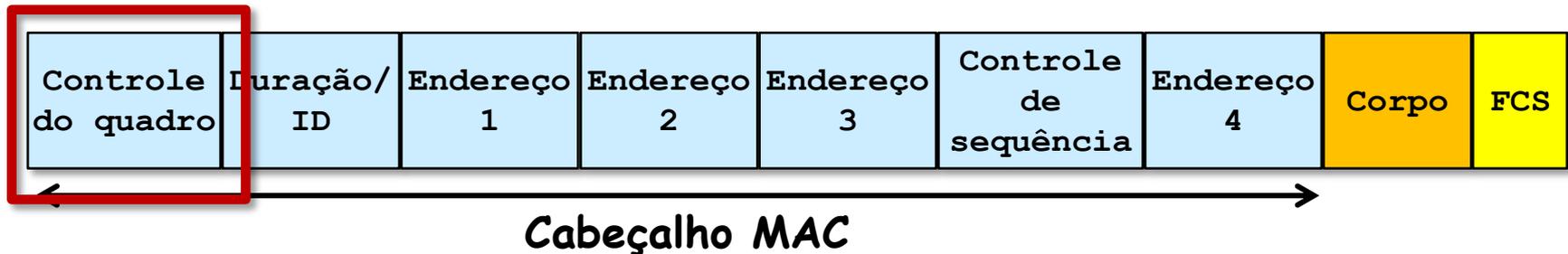
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- Controle de quadro (2 Bytes)
 - Subdividido em 11 campos
 - Para DS (1 bit)
 - Indica se o quadro de dados é destinado ao sistema de distribuição
 - De DS (1 bit)
 - Indica se o quadro de dados está deixando o sistema de distribuição



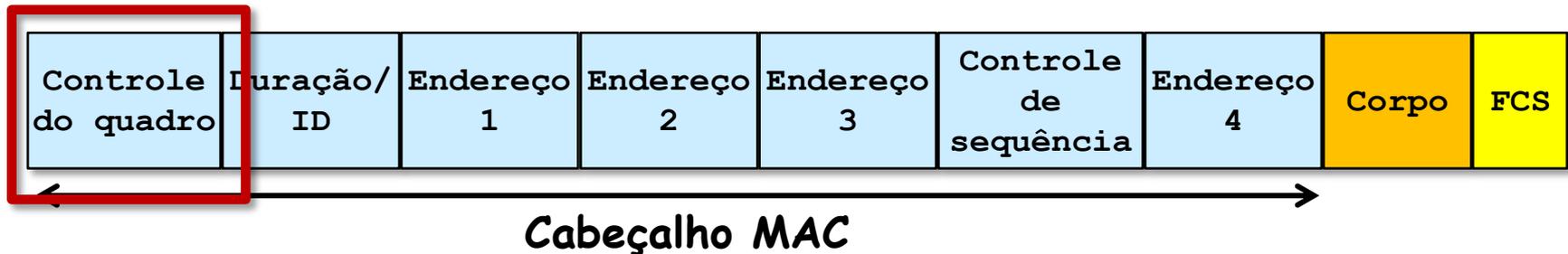
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- Controle de quadro (2 Bytes)
 - Subdividido em 11 campos
 - MF (1 bit)
 - Indica se o quadro possui mais fragmentos
 - Repetir (1 bit)
 - Indica se o quadro é uma retransmissão
 - Potência (1 bit)
 - Indica se a estação está em modo de economia de recursos



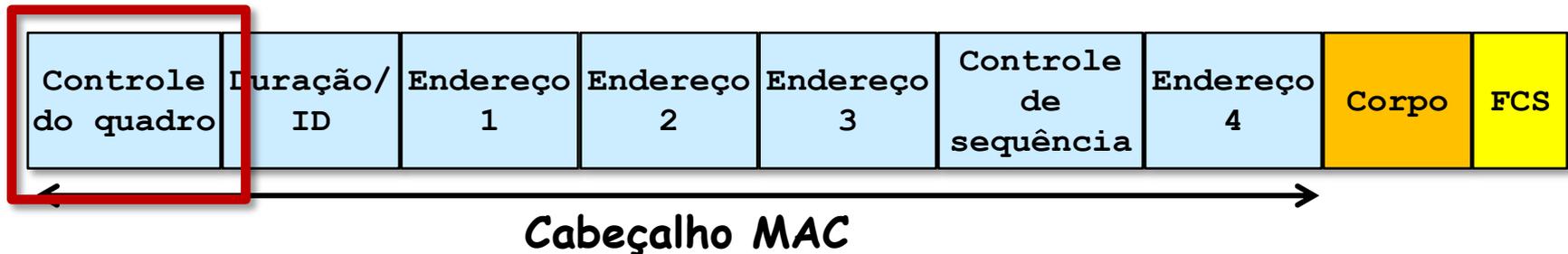
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- Controle de quadro (2 Bytes)
 - Subdividido em 11 campos
 - Mais (1 bit)
 - Indica se o ponto de acesso tem mais quadros para enviar para a estação
 - » Estação não deve entrar em modo de economia de recursos
 - WEP (1 bit)
 - Indica se o corpo da mensagem tem informações processadas com o WEP



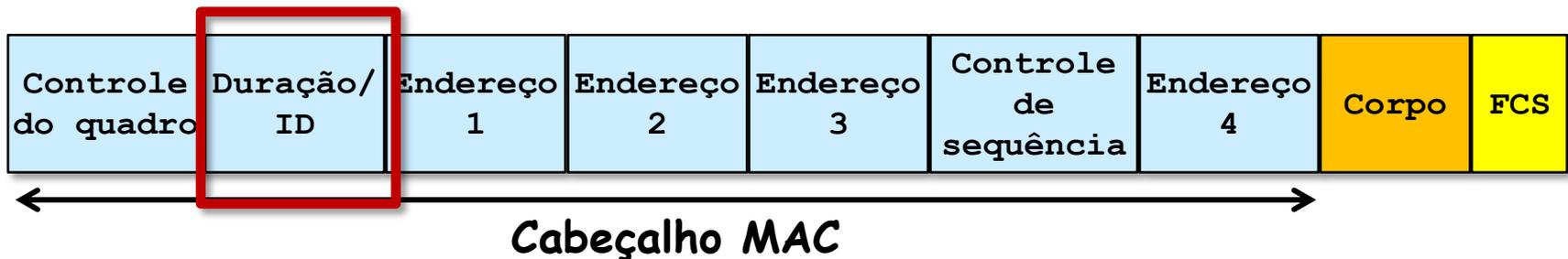
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- Controle de quadro (2 Bytes)
 - Subdividido em 11 campos
 - Ordem (1 bit)
 - Indica se a sequência de quadros deve ser processada em obrigatoriamente em ordem



Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- Duração (2 Bytes)
 - Tempo completo de duração da transmissão
 - Usado no NAV



Formato dos Quadros do IEEE 802.11

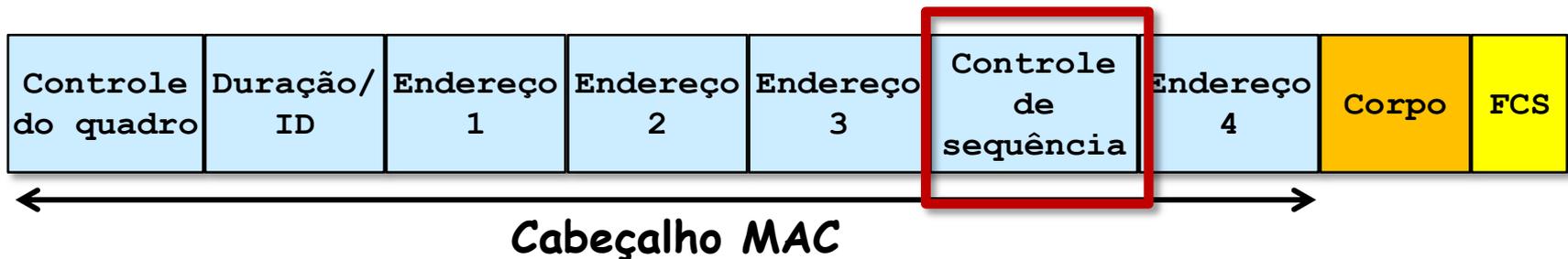
- Endereços 1, 2, 3 e 4 (6 Bytes cada um)
 - Podem ser:
 - Origem ou destino do quadro
 - Receptor ou transmissor
 - Origem e destino no salto atual
 - BSSID
 - Identificação do BSS
 - » Infraestruturado: Endereço do ponto de acesso
 - » Ad hoc: Valor aleatório

Os endereços utilizados dependem do tipo do quadro



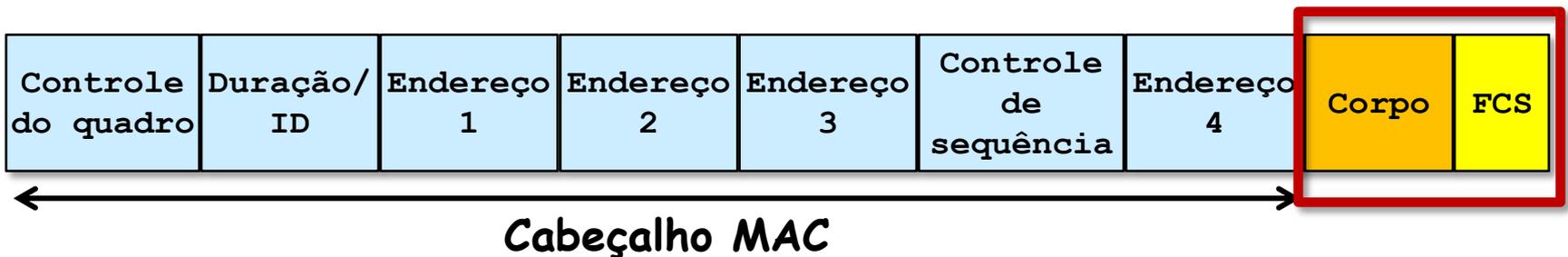
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- Controle de sequência (2 Bytes)
 - Subdividido em 2 campos
 - Número de sequência do quadro (12 bits)
 - Incrementado de 1 a cada quadro
 - Repetido a cada retransmissão
 - Número de sequência do fragmento (4 bits)
 - Incrementado de 1 a cada fragmento
 - Repetido a cada retransmissão



Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- Corpo (0-2312 Bytes)
 - Tamanho mínimo é zero e máximo é de 2312 Bytes
- FCS (4 Bytes)
 - CRC de todo o cabeçalho e mais o corpo do quadro



Formato dos Quadros de CONTROLE do IEEE 802.11

- Controle de quadro
 - Versão, Subtipo e Potência tem valores variáveis
 - Tipo = **controle**
 - Para DS=De DS=MF=Repetir=Mais=WEP=Ordem = 0
- Outros campos dependem do subtipo
 - Por exemplo, RTS, CTS ou ACK

Formato dos Quadros de CONTROLE do IEEE 802.11

- No caso do RTS...
 - Duração
 - Tempo em microssegundos para enviar CTS, dados e ACK e mais os intervalos entre quadros (3 SIFS)
 - Endereço do receptor e do transmissor
 - Endereço do receptor e do transmissor do RTS
 - FCS



Formato dos Quadros de CONTROLE do IEEE 802.11

- No caso do CTS...
 - Duração
 - Tempo recebido no RTS - (tempo de envio do CTS + SIFS)
 - Endereço do receptor
 - Endereço do transmissor copiado do RTS
 - FCS



Formato dos Quadros de CONTROLE do IEEE 802.11

- No caso do **ACK**...
 - Duração
 - Tempo igual a zero (exceto se MF = 1)
 - Se MF = 1, a duração é calculada como a duração do quadro recebido imediatamente antes - (tempo de envio do ACK + SIFS)
 - Endereço do receptor
 - Endereço 2 copiado do quadro recebido imediatamente antes (endereço do transmissor)
 - FCS



Formato dos Quadros de DADOS do IEEE 802.11

- Independente do subtipo
 - Porém, endereços usados dependem dos campos Para DS e De DS



Formato dos Quadros de DADOS do IEEE 802.11

- Ad Hoc

- Para DS = 0, De DS = 0
- Endereços de destino, origem e BSSID

| | | | | | | | |
|--------------------|------------|------------------|-----------------|-------|-----------------------|-------|-----|
| Controle do quadro | Duração/ID | Endereço destino | Endereço origem | BSSID | Controle de sequência | Corpo | FCS |
|--------------------|------------|------------------|-----------------|-------|-----------------------|-------|-----|

- Infraestruturada vindo de um ponto de acesso

- Para DS = 0, De DS = 1
- Endereços de destino, BSSID e origem

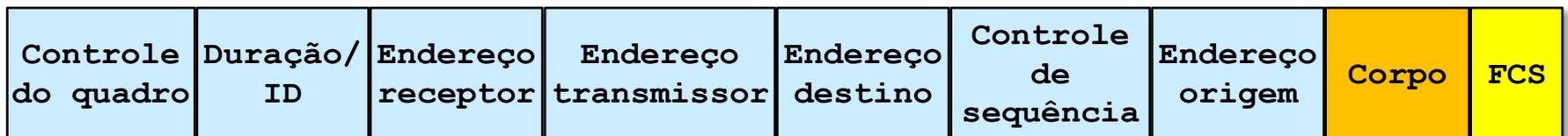
| | | | | | | | |
|--------------------|------------|------------------|-------|-----------------|-----------------------|-------|-----|
| Controle do quadro | Duração/ID | Endereço destino | BSSID | Endereço origem | Controle de sequência | Corpo | FCS |
|--------------------|------------|------------------|-------|-----------------|-----------------------|-------|-----|

Formato dos Quadros de DADOS do IEEE 802.11

- Infraestruturada para um ponto de acesso
 - Para DS = 1, De DS = 0
 - Endereços de BSSID, origem e destino

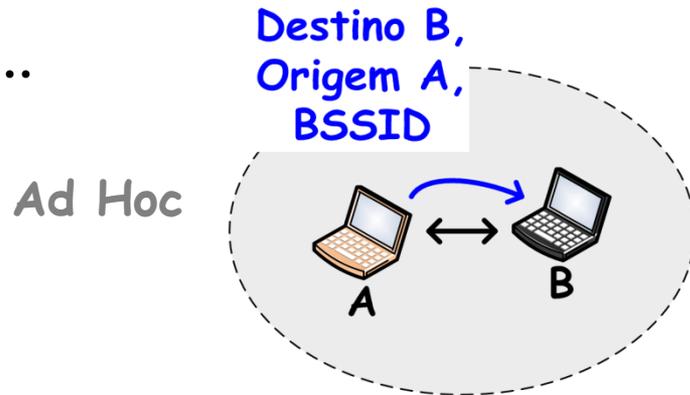


- Infraestruturada, dentro do DS sem-fio
 - Para DS = 1, De DS = 1
 - Endereços de receptor, transmissor, destino e origem

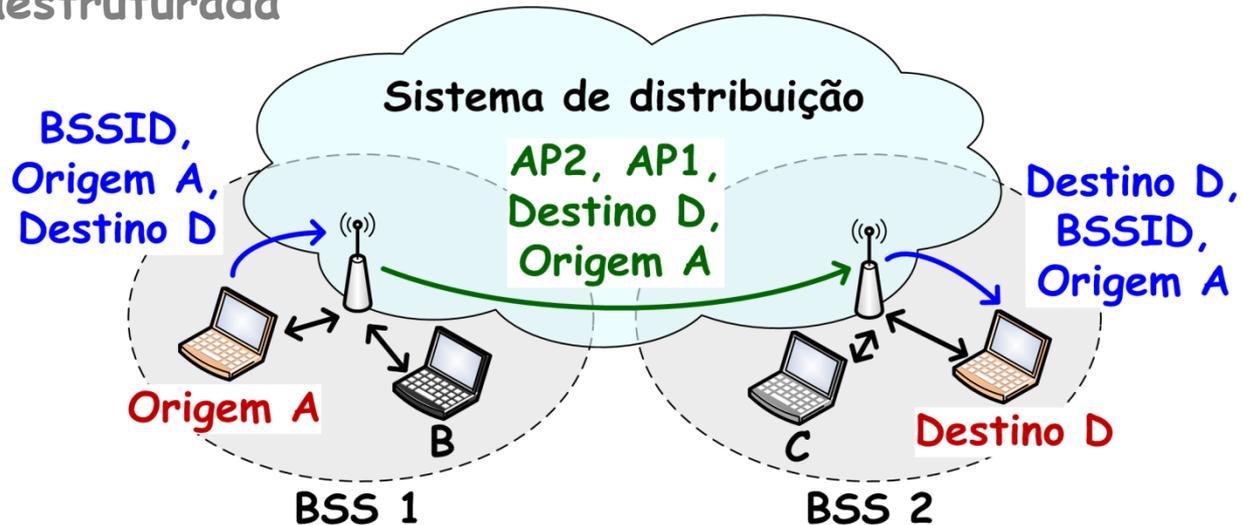


Formato dos Quadros de DADOS do IEEE 802.11

- Resumindo...



Infraestruturada



Análise da Capacidade de uma Rede IEEE 802.11

- Rubinstein, M. G., Costa, L. H. M. K., Campista, M. E. M., Cunha, D. O., Amodei Jr., A., Velloso, P. B., and Duarte, O. C. M. B. - "*Analysis of Medium Access Control Protocols for Home Networks*", in *Journal of Communication and Information Systems*, ISSN 1981-6604, v. 22, p. 10-23, 2007

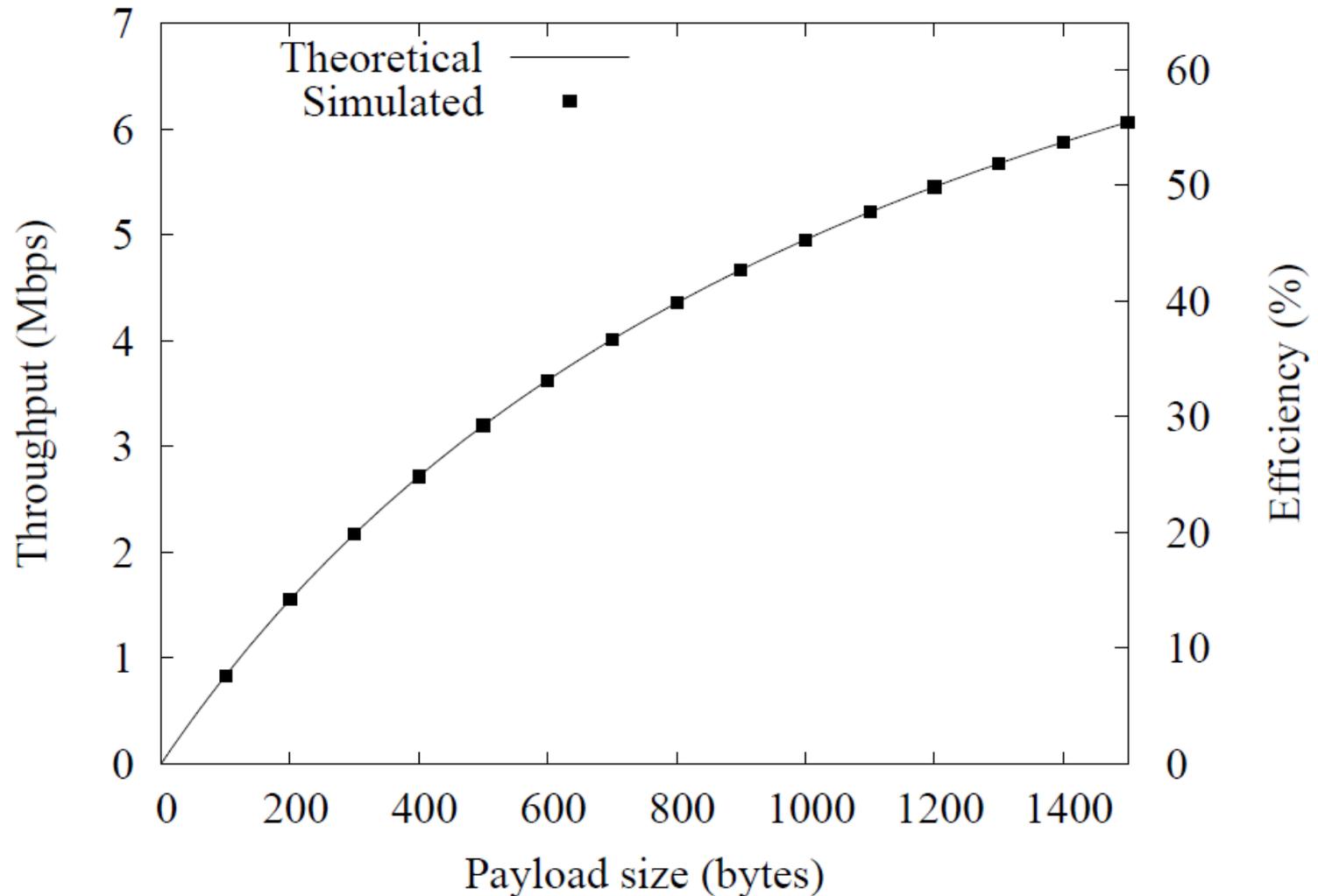
Capacidade do IEEE 802.11b

$$T_{802.11b} = T_{DIFS} + \frac{CW_{min}}{2} \times T_{slot} + T_{PHY} + \frac{(L_{DATA} + 28)}{R_{DATA}} \times 8 + T_{SIFS} \\ + T_{PHY} + \frac{L_{ACK}}{R_{CTL}} \times 8 \text{ (}\mu\text{s)}$$

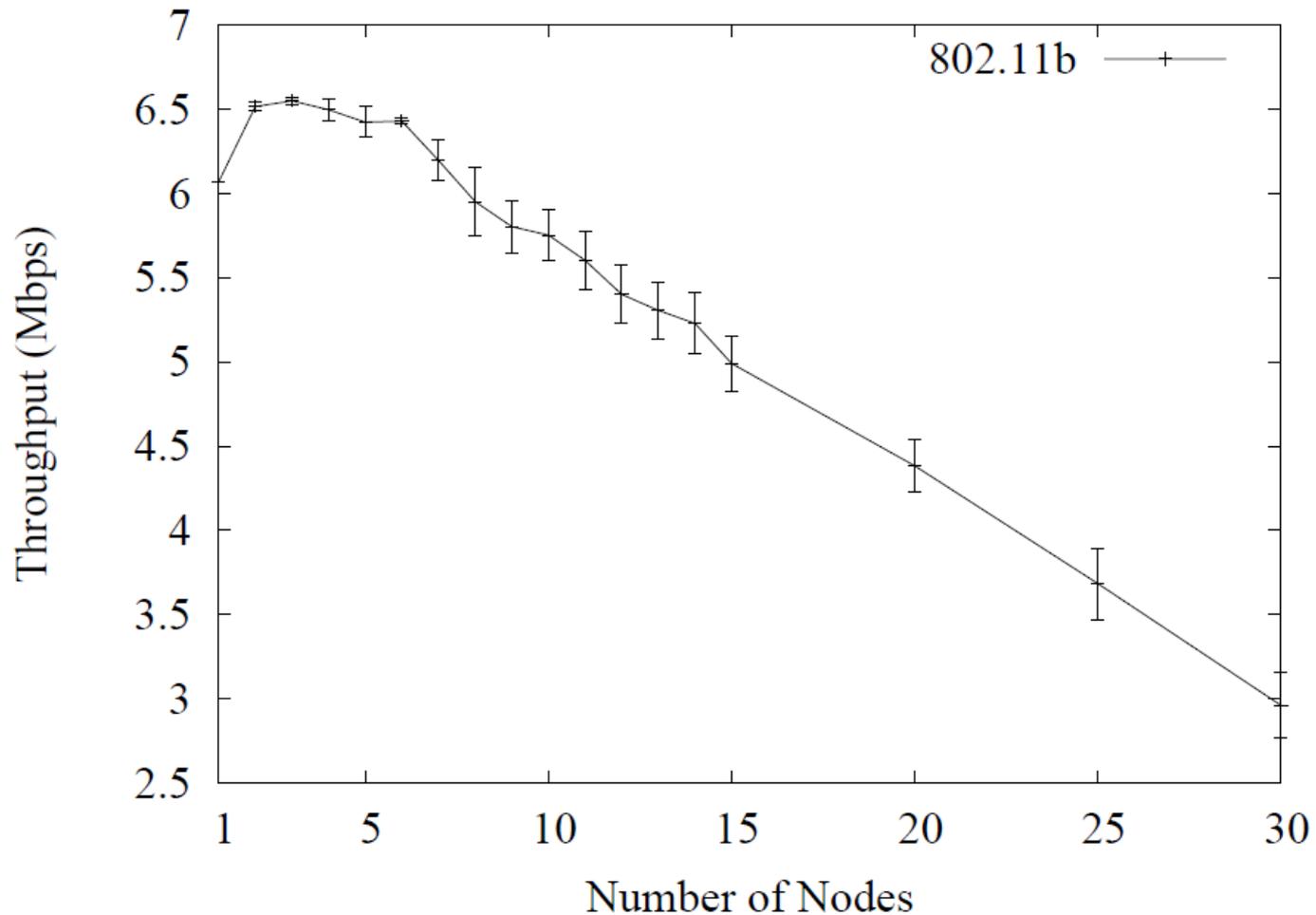
$$T_{802.11b} = 50 + \frac{31}{2} \times 20 + 192 + \frac{(L_{DATA} + 28)}{11} \times 8 + 10 + 192 + \frac{14}{1} \\ \times 8 \text{ (}\mu\text{s)}$$

$$Th_{802.11b} = \frac{L_{DATA} \times 8}{866 + \frac{224 + 8 \times L_{DATA}}{11}} \text{ (Mbps)}$$

Capacidade do IEEE 802.11b



Capacidade do IEEE 802.11b



Capacidade do IEEE 802.11g

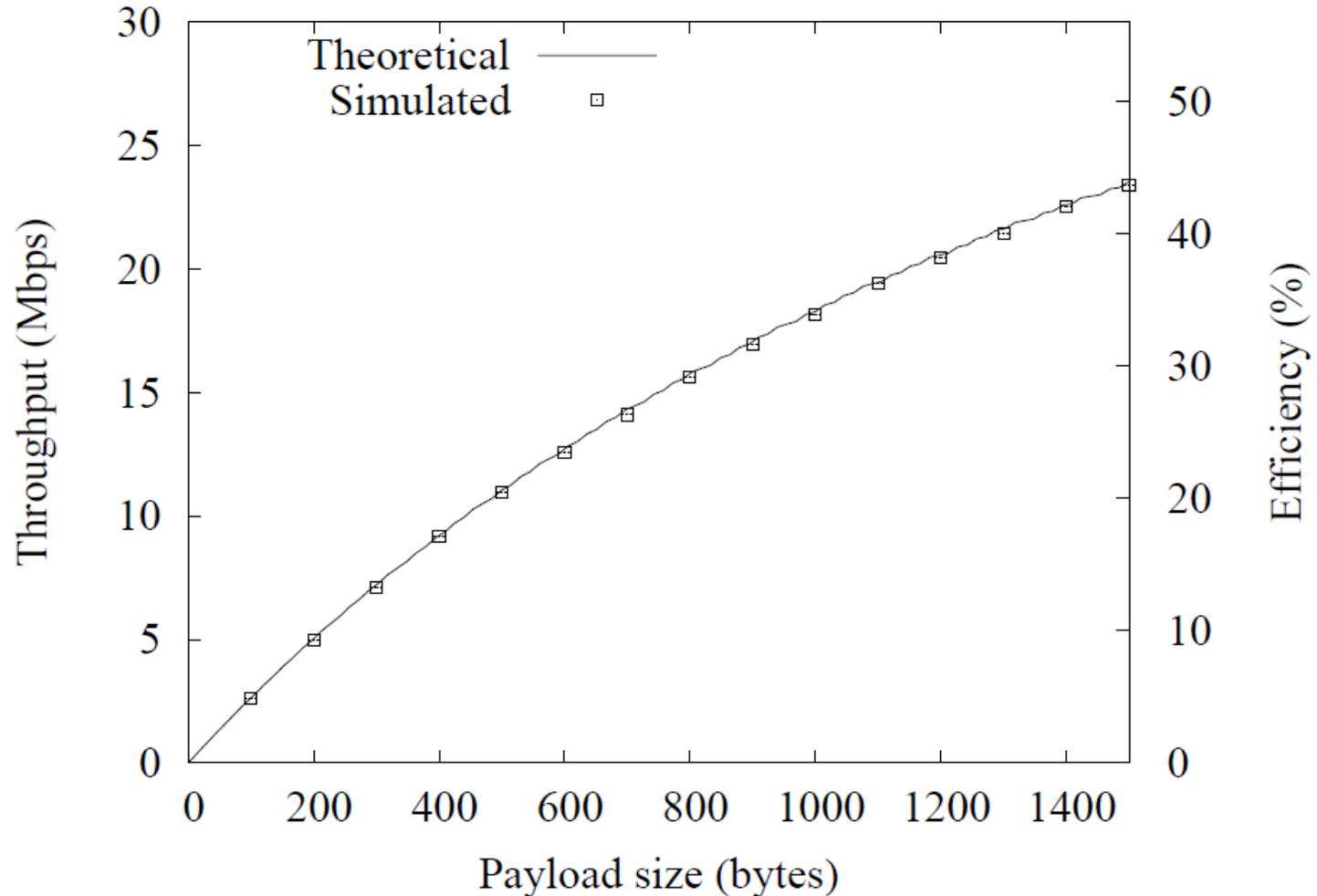
$$T_{802.11g} = T_{DIFS} + \frac{CW_{min}}{2} \times T_{slot} + T_{PHY} + N_{SYM} \times T_{SYM} + T_{EXT} + T_{SIFS} \\ + T_{PHY} + \left\lceil \frac{16 + 8 \times L_{ACK} + 6}{N_{DBS}} \right\rceil \times T_{SYM} + T_{EXT} (\mu s)$$

$$N_{SYM} = \left\lceil \frac{16 + 8 \times (L_{DATA} + 28) + 6}{N_{DBS}} \right\rceil$$

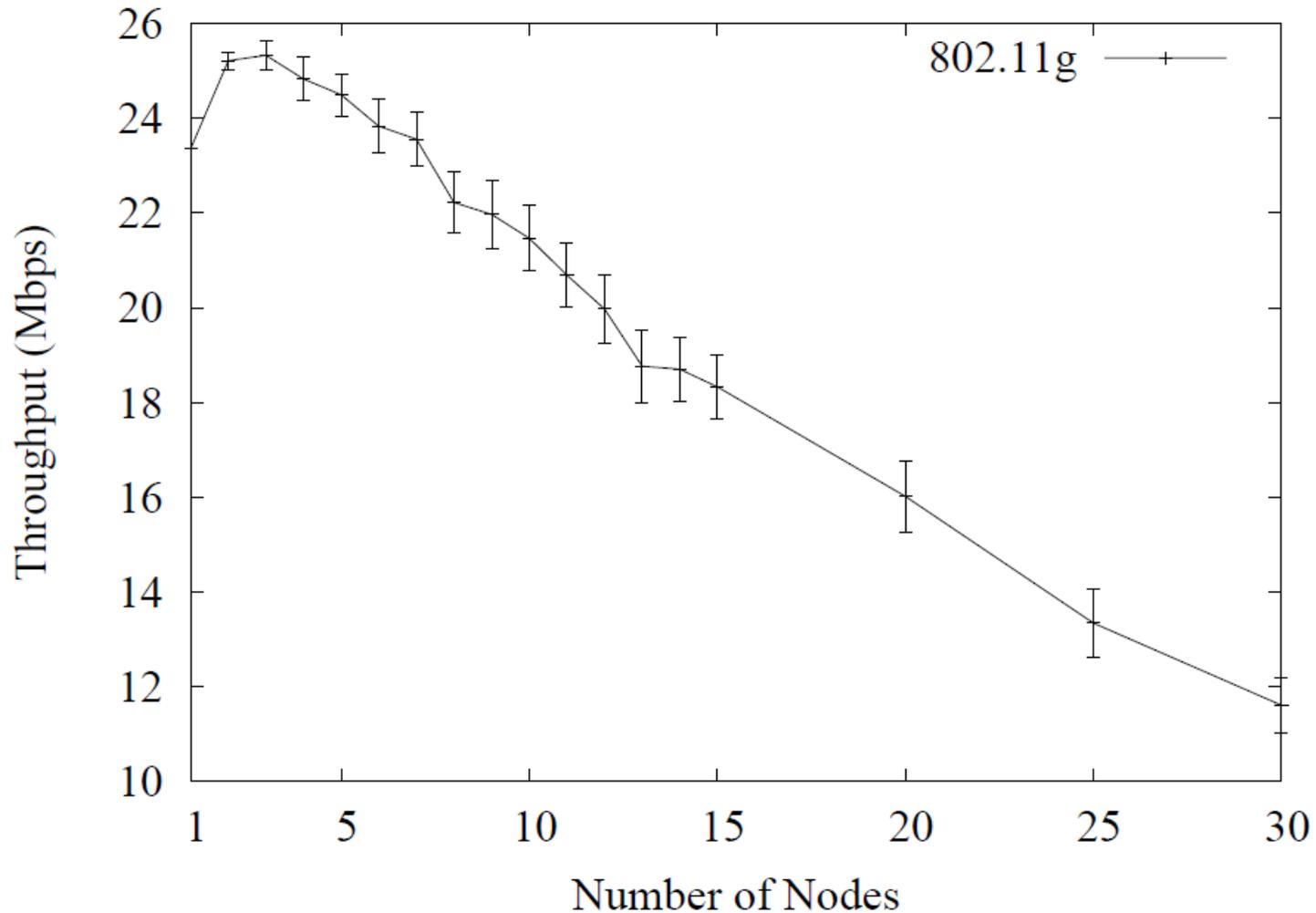
$$T_{802.11g} = 50 + \frac{15}{2} \times 20 + 20 + \left\lceil \frac{16 + 8 \times (L_{DATA} + 28) + 6}{216} \right\rceil \times 4 + 6 \\ + 10 + 20 + \left\lceil \frac{16 + 8 \times 14 + 6}{24} \right\rceil \times 4 + 6 (\mu s)$$

$$Th_{802.11g} = \frac{L_{DATA} \times 8}{286 + \left\lceil \frac{246 + 8 \times L_{DATA}}{216} \right\rceil \times 4} (Mbps)$$

Capacidade do IEEE 802.11g



Capacidade do IEEE 802.11g



Economia de Energia no Modo Infraestruturado

- Estações devem informar os pontos de acesso que vão entrar em modo de economia de energia
 - Informação através do bit potência em 1
- Pontos de acesso não podem deliberadamente enviar quadros para estações em economia de energia
 - Pontos de acesso devem armazenar os quadros em *buffer* e só enviar às estações em modo de economia de recursos em "momentos oportunos"

O que são esses "momentos oportunos"?

Economia de Energia no Modo Infraestruturado

- Estações que possuem quadros armazenados em *buffers* do ponto de acesso são identificadas
 - Identificação é feita através do campo *Traffic Indication Map* (TIM) dos *beacons* gerados pelo próprio ponto de acesso
- Estações devem receber *beacons* e interpretá-los
 - Cada estação deve periodicamente escutar *beacons* para saber se o ponto de acesso possui quadros para ele
 - Tal escuta periódica ocorre mesmo em modo de economia de energia

Economia de Energia no Modo Infraestruturado

- Estações que possuem quadros armazenados em *buffers* do ponto de acesso são identificadas
 - Identificação é feita através do campo *Traffic Indication Map* (TIM) dos *beacons* gerados pelo próprio

Funcionamento requer sincronismo entre o envio de informações sobre quadros armazenados e modo ativo das estações

de energia

Economia de Energia no Modo Infraestruturado

- Estações em modo de economia de energia (*Power Save - PS*) podem realizar duas ações ao descobrir que possui quadro armazenado no ponto de acesso:
 - Podem transmitir um quadro *PS-Poll* para o ponto de acesso, que imediatamente responde com o quadro
 - Ou
 - Podem transmitir um quadro *PS-Poll* para o ponto de acesso, que reconhece a recepção, mas deixa para responder mais tarde

Economia de Energia no Modo Infraestruturado

- Estações permanecem em modo PS até que informem o ponto de acesso do contrário
 - Informação é passada após troca bem sucedida de quadros iniciada pela estação
 - Modo de operação não pode mudar durante uma sequência de troca de quadro
- Estações que queiram sair do modo de economia devem detectar uma sequência de quadros
 - Dessa maneira conseguem ajustar corretamente o NAV

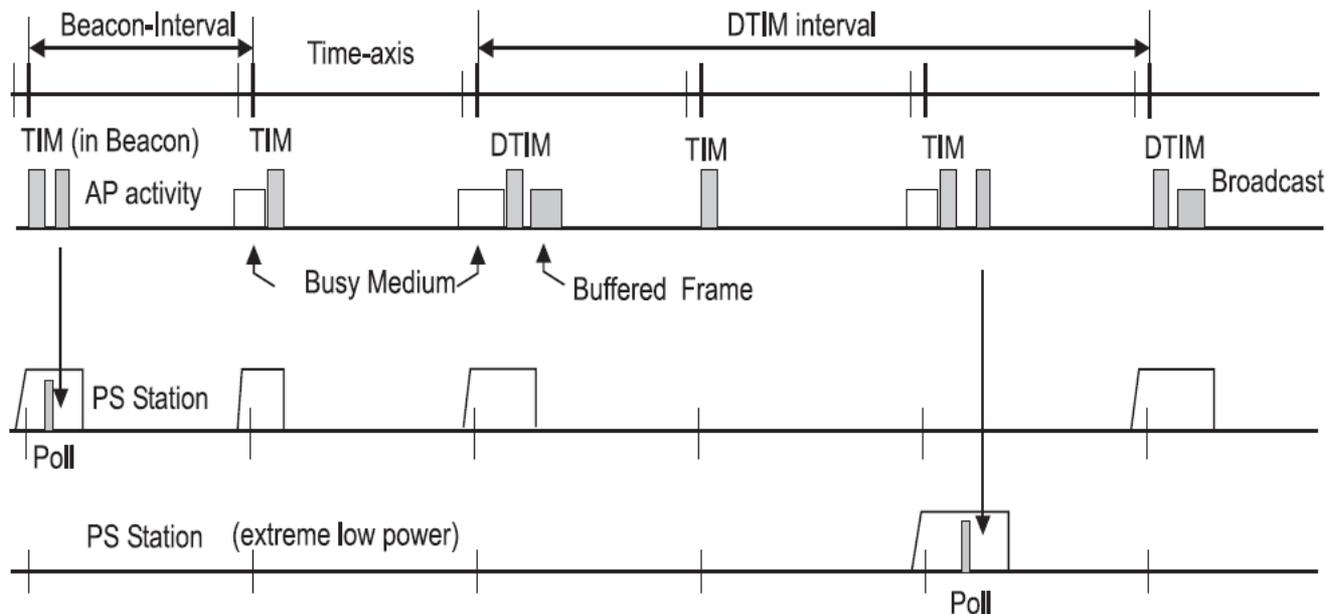
Economia de Energia no Modo Infraestruturado

| Modos | Operações |
|---|--|
| Ativo (estado <i>awake</i>) | Estações podem receber quadros a qualquer instante de tempo |
| Economia de energia (Power Save - PS) (estado <i>doze</i>) | <p>Estações escutam os <i>beacons</i> selecionados a partir de um intervalo ajustado por parâmetro e envia quadros PS-Po11 para o ponto de acesso, se o TIM do último <i>beacon</i> recebido indicar quadro armazenado para a própria estação</p> <p>O ponto de acesso transmite os quadros armazenados diretamente para a estação somente como resposta a um PS-Po11 da própria estação</p> <p>Uma estação em modo PS pode voltar ao modo ativo para receber <i>beacons</i> selecionados, para receber mensagens em broadcast e em multicast depois da recepção de <i>beacons</i> específicos, para transmitir e para esperar a resposta a quadros PS-Po11 enviados</p> |

Transmissão do TIM pelos Pontos de Acesso

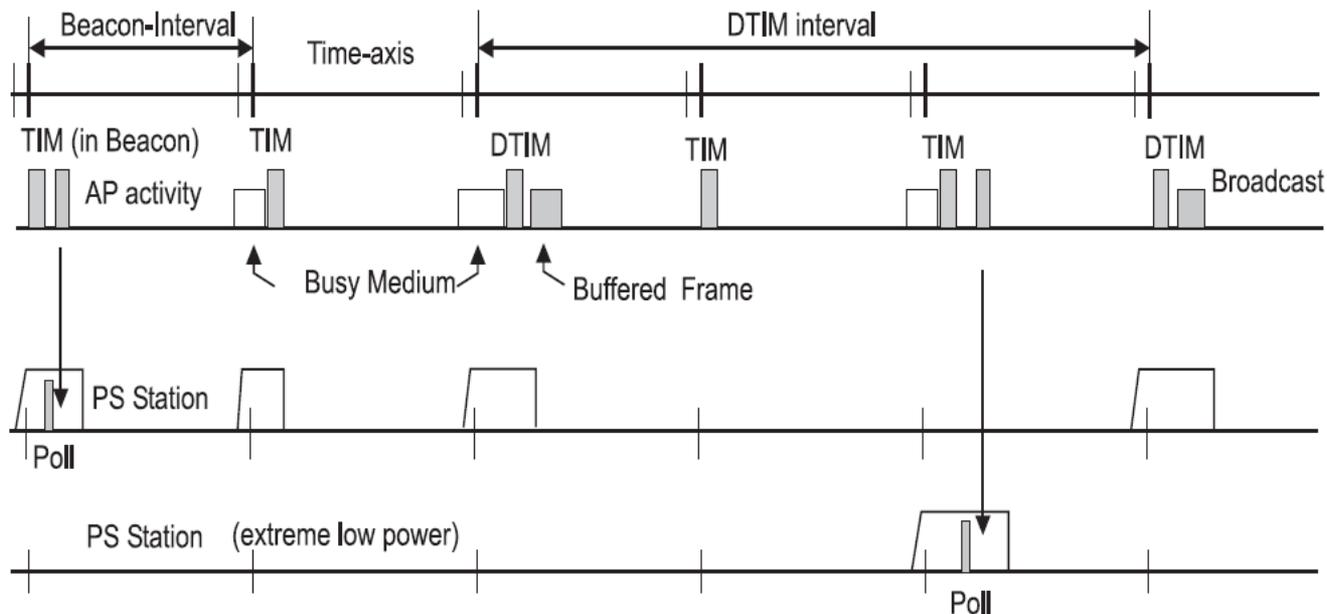
- Pontos de acesso têm que indicar as estações que possuem quadros armazenados em *buffer*
 - Informação é codificada no *partial virtual bitmap* do *beacon*
 - Estações possuem identificador atribuído no momento da associação com o ponto de acesso
 - Transmissões Unicast: **Codificam o AID (Association ID) da estação no *partial virtual bitmap* do *beacon***
 - Multicast/Broadcast: **Codificam AID = 0 no *partial virtual bitmap* do *beacon***

Transmissão do TIM pelos Pontos de Acesso



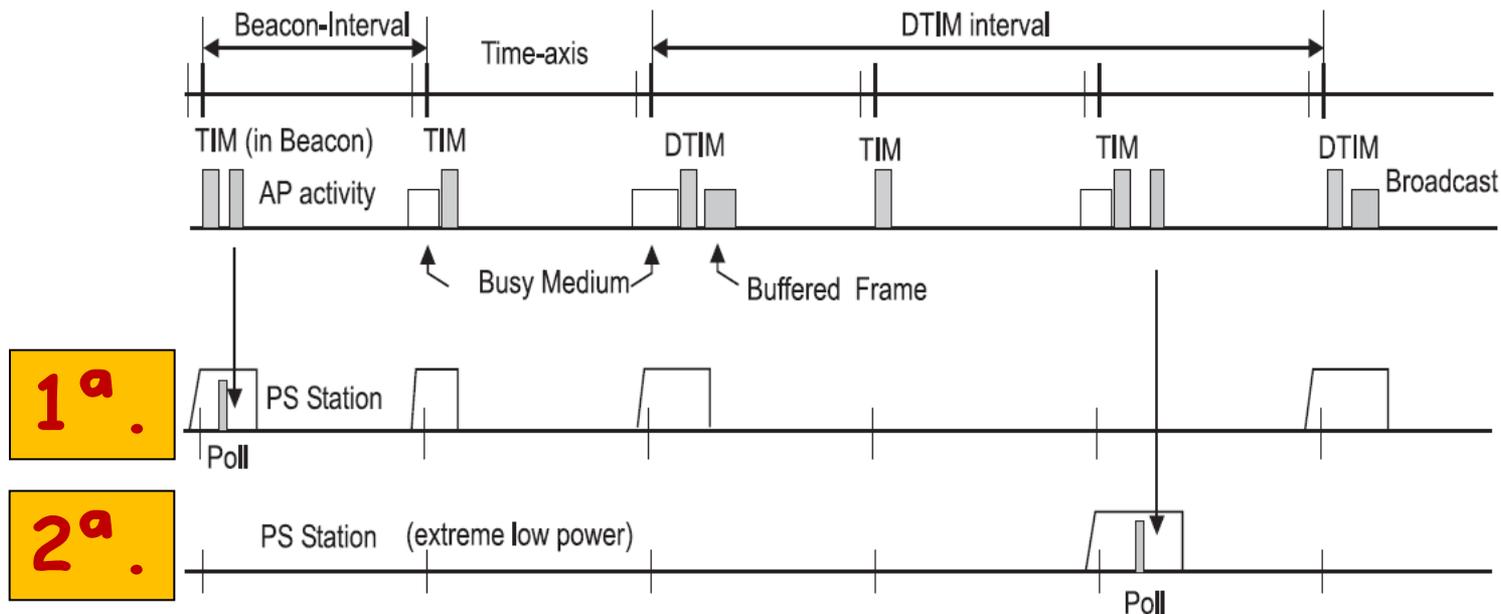
TIM enviado em cada beacon e, de tempos em tempos, o DTIM é enviado no lugar do TIM

Transmissão do TIM pelos Pontos de Acesso



DTIM é usado para enviar mensagens de broadcast/multicast

Transmissão do TIM pelos Pontos de Acesso



Estações com estratégias de economia de energia diferentes, p.ex., a segunda não fica ativa nem nos intervalos de DTIM

Operação dos Pontos de Acesso

- Armazenam quadros das estações em modo PS
 - Mantêm status de todas as estações associadas sobre operação ou não em modo de economia de energia
- Enviam os quadros diretamente às estações que não estiverem em modo PS
- Enviam informações sobre quadros armazenados nos *beacons*
 - Usam os quadros TIM e DTIM

Operação dos Pontos de Acesso

- Após DTIM enviam quadros em broadcast/multicast
 - Caso não consigam enviar tudo em um único intervalo, continuam na próxima oportunidade
- Envia quadros para as estações em modo PS assim que quadros PS-Poll são recebidos
- Armazena quadros para estações por tempo finito
 - Após um período máximo, os quadros são deletados
- Envia quadros sem receber PS-Poll para estações que mudam do modo PS para modo ativo

Operação das Estações

- Tornam-se ativas suficientemente antes do próximo intervalo de *beacon*
- Envia PS-Poll sempre que percebem que o seu AID está listado no *beacon*
 - Se mais de uma estação estiver listada, envio do PS-Poll é adiado por tempo aleatório entre $[0, CW_{min}]$
 - Estações devem ficar acordadas até receberem a resposta do PS-Poll ou até o ponto de acesso sinalizar que não possui mais quadro para a estação
 - Caso novo *beacon* indique que o ponto de acesso ainda possui quadro, a estação deve enviar outro PS-Poll

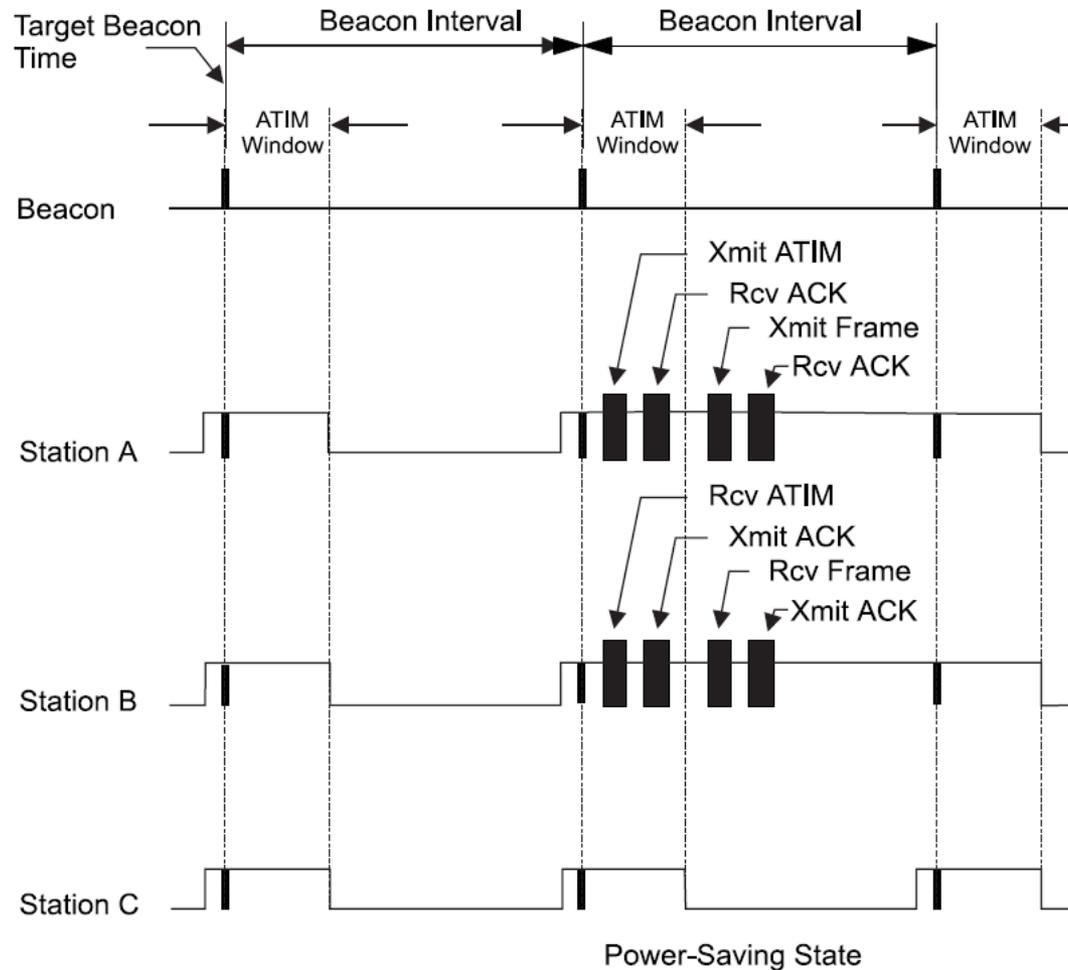
Operação das Estações

- Envia novo PS-Poll quando conveniente, caso o ponto de acesso ainda possua quadros para enviar
 - Envia PS-Poll até que não haja mais quadros
- Acordam suficientemente antes também da recepção do *beacon DTIM*
 - Estações devem ficar acordadas até que todos os dados sejam enviados ou até que o ponto de acesso sinalize que não há mais quadros

Economia de Energia no Modo Ad Hoc

- Estações usam o *Ad hoc Traffic Indication Message* (ATIM)
- Quando uma estação quiser enviar um quadro para outra estação em modo PS...
 - Quadros ATIM são enviados em intervalos específicos
 - No intervalo específico, todas as estações devem estar ativas para escutar *beacons* e ATIMs
 - Quadros ATIM são enviados após o *beacon*, usando *backoff* aleatório
 - Quadros ATIM devem ser reconhecidos
 - Caso não receba o *ACK*, a estação transmissora deve retransmitir após *backoff*

Economia de Energia em Modo Ad Hoc



Operação das Estações Ad Hoc

- Estações devem armazenar os quadros para estações que estejam em modo PS
 - Modo de operação das estações deve ser inferido ou anunciado pelas próprias estações
 - Não há mais a centralização no ponto de acesso
 - Quadros só podem ser enviados para estações ativas

Operação das Estações Ad Hoc

- Após a recepção de um *beacon*...
 - Estações devem enviar quadro ATIM para cada estação que possuam quadro a enviar
 - Estações que enviarem um quadro ATIM devem permanecer ativas até o próximo *beacon*
 - Estações devem entrar em backoff para enviar quadros ATIM para evitar colisões
 - Estações devem reconhecer os quadros ATIM
 - Estações devem retransmitir quadros ATIM que não foram reconhecidos usando o procedimento DCF normal

Operação das Estações Ad Hoc

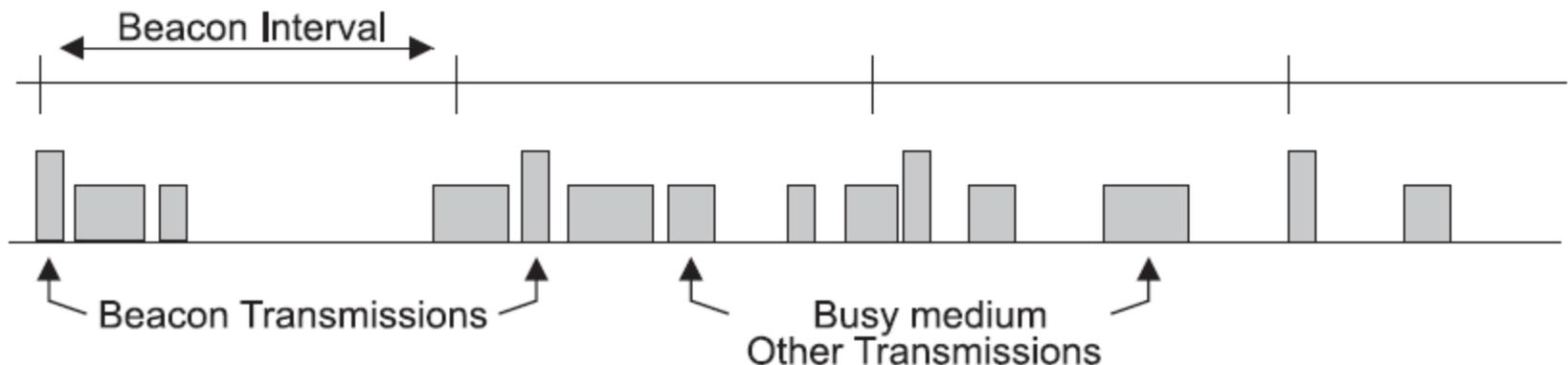
- As estações devem manter o quadro no buffer e esperar uma próxima oportunidade
 - Em caso de contenção pelo meio ou impossibilidade de transmissão
- Após a janela ATIM...
 - Estações devem enviar quadros em broadcast, seguido pelos em multicast e por último pelos em unicast
 - Estações devem entrar em backoff para transmissão de qualquer quadro

Operação das Estações Ad Hoc

- Estações podem transmitir quadros sem anúncio caso seja sabido que as estações receptoras estão ativas
 - Durante o mesmo período entre *beacons*
- Estações podem descartar quadros armazenadas após um tempo máximo ou após alguma condição interna especial
 - Por exemplo, a estação está com o buffer cheio

Manutenção do sincronismo

- Requer o uso de *beacons*
 - Geração de *beacons* em redes infraestruturadas
 - Pontos de acesso definem o intervalo entre *beacons*
 - Intervalo conhecido pelas estações ao entrarem na BSS
 - Caso o meio esteja ocupado, o ponto de acesso adia a tentativa de envio do *beacon*



Manutenção do sincronismo

- Requer o uso de *beacons*
 - Geração de *beacons* em redes *ad hoc* é distribuída
 - Todas as estações geram *beacons* em intervalos definidos pela estação que instanciou a IBSS
 - Transmissão do *beacon* deve ocorrer após atraso aleatório sorteado com $[0, 2 * CW_{\min}]$

Adaptação Dinâmica de Taxas de Transmissão

- Padrão não define algoritmo para adaptação dinâmica de taxas
 - Assume que múltiplas taxas podem existir dependendo da camada física
- Padrão apenas define regras que devem ser adotadas por questões de coexistência e interoperabilidade
 - Quadros de controle devem ser enviados em taxa básica ou em uma taxa que todas as estações entendam
 - **Idem para quadros em broadcast/multicast**
 - Quadros de dados devem utilizar taxas definidas pelo algoritmo de adaptação dinâmica de taxas

Segurança

- Tópico importante para aceitação das redes sem-fio
 - Esquemas de segurança do IEEE 802.11 apresentam problemas
- Segurança no IEEE 802.11
 - Implica autenticação e privacidade no mesmo nível que nas redes locais cabeadas

Autenticação

- Possui dois tipos de serviços identificados nos quadros de gerenciamento:
 - Sistema aberto
 - Chave compartilhada
- É realizada entre pares de estações
 - Rede infraestruturada: Entre estação e ponto de acesso
 - Sempre iniciada pela estação
 - Rede ad hoc: Entre pares de estações
 - Iniciada por qualquer uma das duas estações

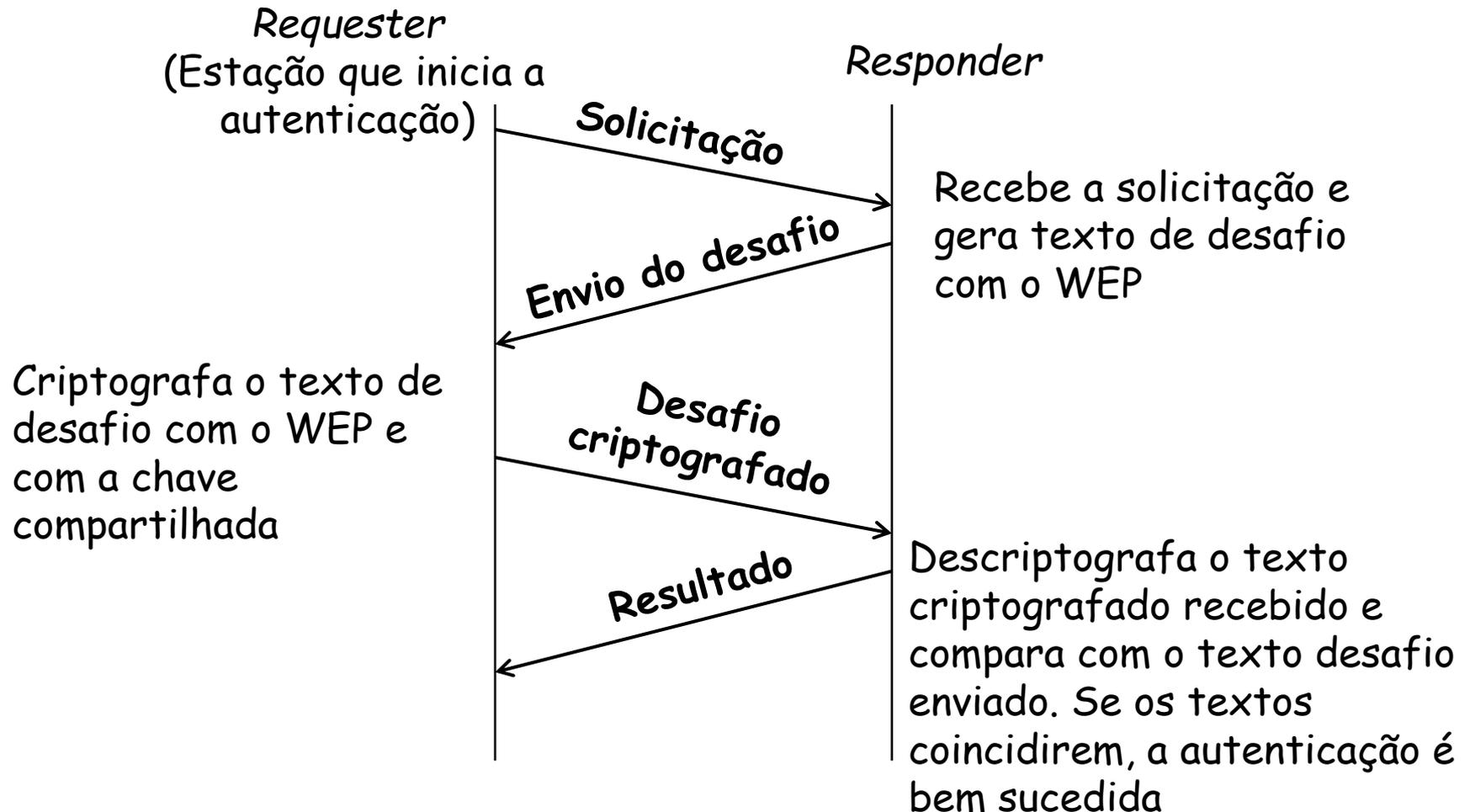
Autenticação por Sistema Aberto

- Mais simples dos dois serviços...
 - Não requer autenticação
 - Estação envia pedido de autenticação demonstrando que não usa autenticação
 - Estação receptora "autentica" se aceitar esse tipo de autenticação

Autenticação por Chave Compartilhada

- Suporta a autenticação das estações
 - Estações podem conhecer ou não a chave compartilhada
 - Chave compartilhada não precisa ser enviada em claro
 - Autenticação requer, porém, uso do mecanismo de privacidade do WEP
 - Chave compartilhada deve ser distribuída usando um canal seguro independente do IEEE 802.11
 - Tanto o desafio quanto o desafio encriptado devem ser transmitidos, facilitando a descoberta da sequência pseudoaleatório usada na geração do par Chave/IV
 - Implementações devem evitar a repetição da Chave/IV

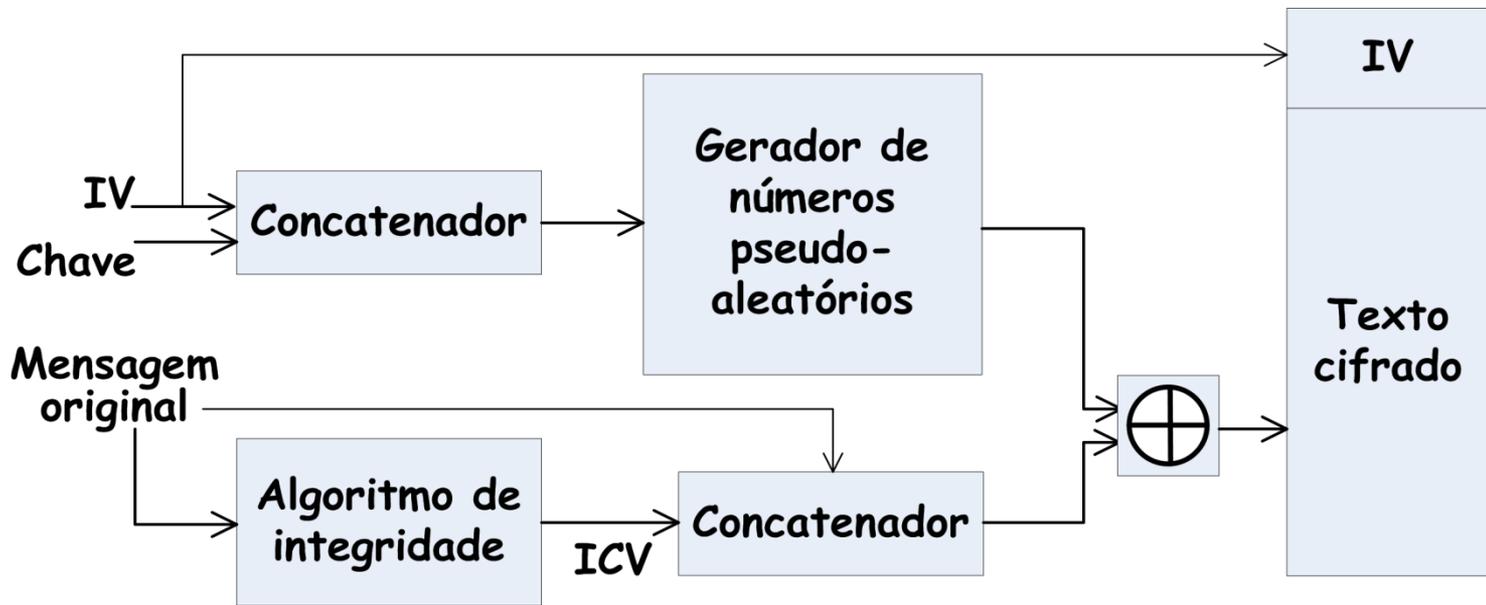
Autenticação por Chave Compartilhada



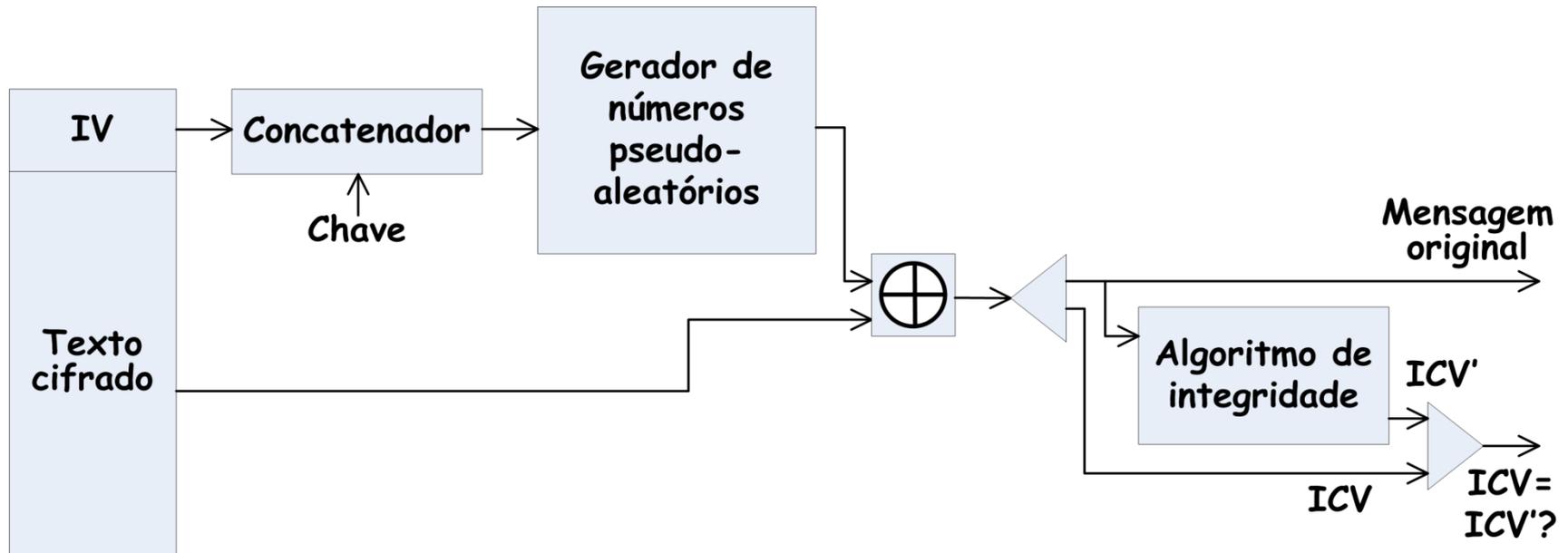
Privacidade

- Usa o WEP (*Wired Equivalent Privacy*)
 - Provou-se menos seguro do que anteriormente previsto
- Segurança
 - Privacidade → criptografia simétrica
 - Integridade → CRC
- Transmissor e receptor compartilham uma chave secreta de 40 ou 104 bits
- Vetor de inicialização (IV) de 24 bits
- Algoritmo de integridade → CRC-32

Privacidade: Encriptação



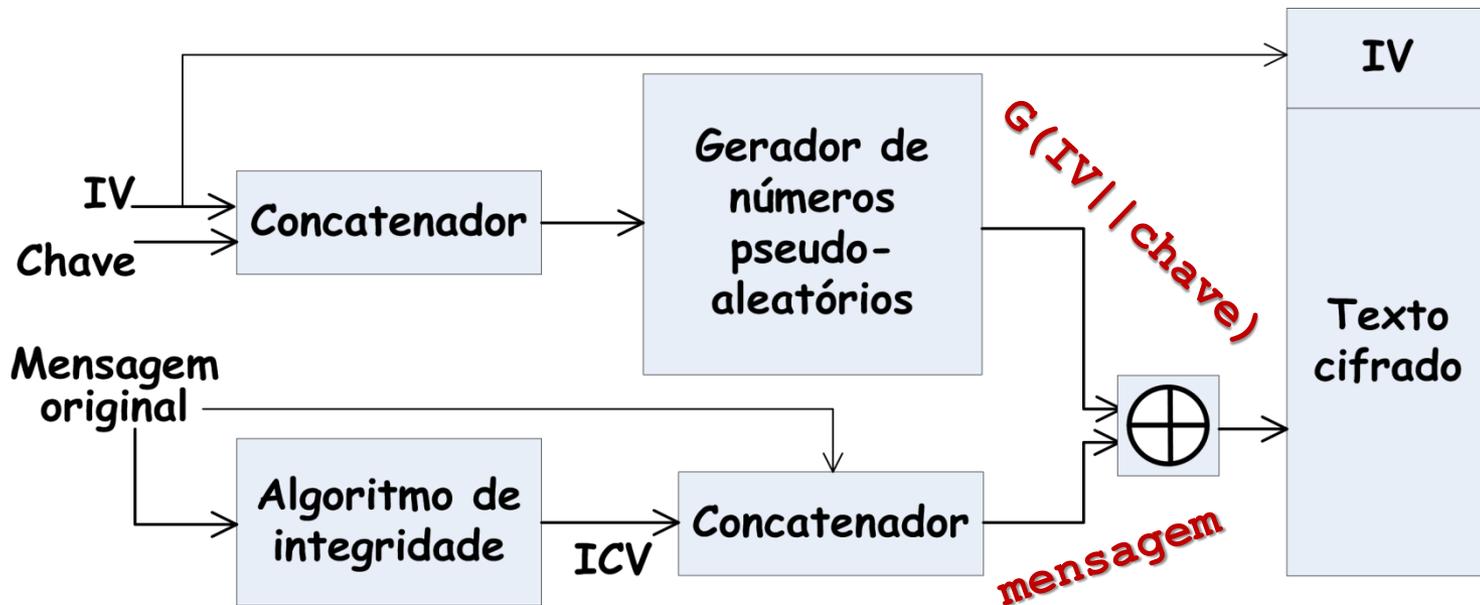
Privacidade: Decriptação



Problemas da Privacidade com o WEP

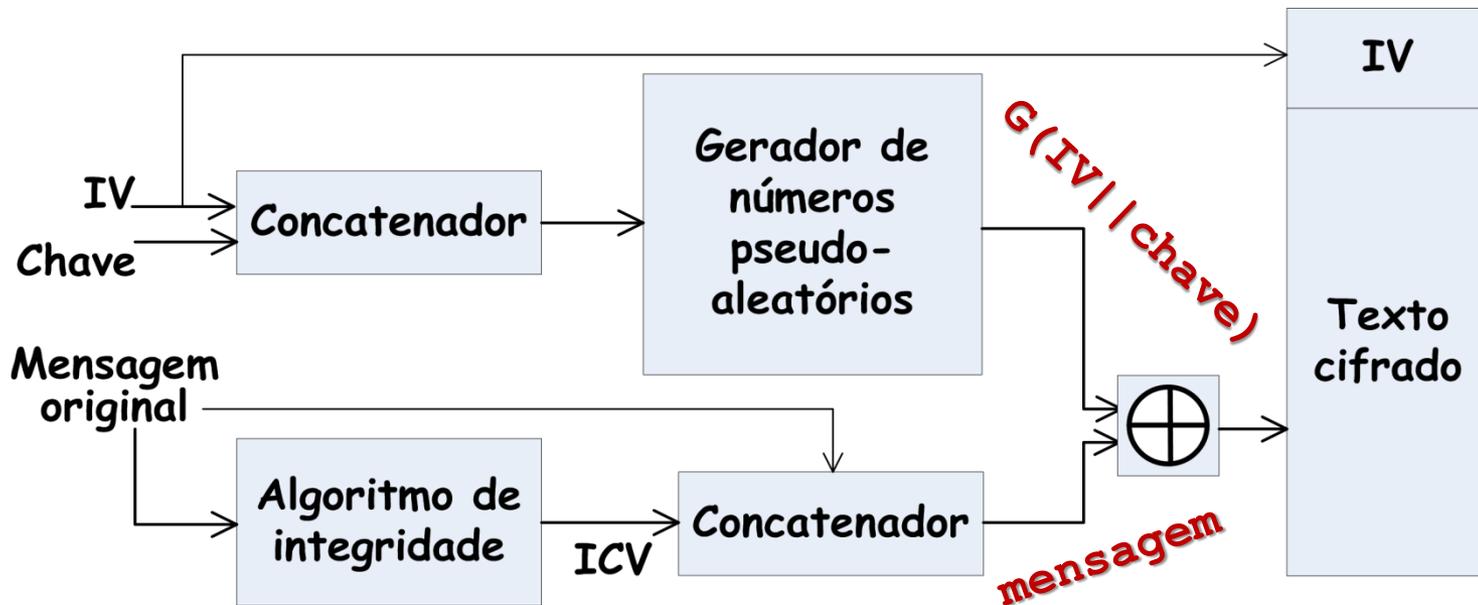
- Reutilização e o envio em texto claro dos IVs
 - Ou-exclusivo de duas ou mais mensagens que usaram um mesmo IV → pode-se obter a mensagem
 - Se o IV fosse maior, o tempo para repeti-lo aumentaria
- Uso de uma única chave secreta sem mecanismos de distribuição de chaves
 - Mensagens conhecidas ajudam na descoberta da chave
 - Se o IV fosse modificado de tempos em tempos, utilidade da descoberta da chave diminuiria

Privacidade: Encriptação



Assim que o IV é repetido, o número aleatório também é. Logo... $G(\text{IV} || \text{chave}) \oplus \text{mensagem} \oplus G(\text{IV} || \text{chave}_i) = \text{mensagem}$, onde chave_i é a chave correta, encontrada por força bruta

Privacidade: Encriptação



Se a mensagem original for conhecida...

$$G(\text{IV} || \text{chave}) \oplus \text{mensagem} \oplus \text{mensagem} = G(\text{IV} || \text{chave})$$

Conhecer IV e o gerador facilita na obtenção da chave

Temas Não- ou Fracamente- Abordados no IEEE 802.11

- Além do controle de taxa e da segurança, tem-se
 - Uso de qualidade de serviço
 - Uso de múltiplos canais
 - Uso de antenas direcionais
 - Uso de controle de potência
 - Roteamento em redes ad hoc de múltiplos saltos
 - ...

Temas Adicionais

- Segurança (Fora do escopo do curso)
 - IEEE 802.11i
- Qualidade de serviço
 - IEEE 802.11e
- Controle de taxa
 - Algoritmos ARF, AARF, Onoe, SampleRate, RBAR, OAR etc.
- Múltiplos canais
 - DCA, MMAC etc.

Temas Adicionais

- Antenas direcionais
 - D-MAC, DMAC/DA, CRCM etc.
- Controle de potência
 - PCM etc.
- Roteamento
 - Aula 6!

IEEE 802.11e

- Padronizado em 2005 como uma emenda ao padrão IEEE 802.11
 - Define suporte a Qualidade de Serviço (QoS) na subcamada MAC
 - Segue 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

IEEE 802.11e

- 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*

IEEE 802.11e

- 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*

IEEE 802.11e

- 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 e vídeo

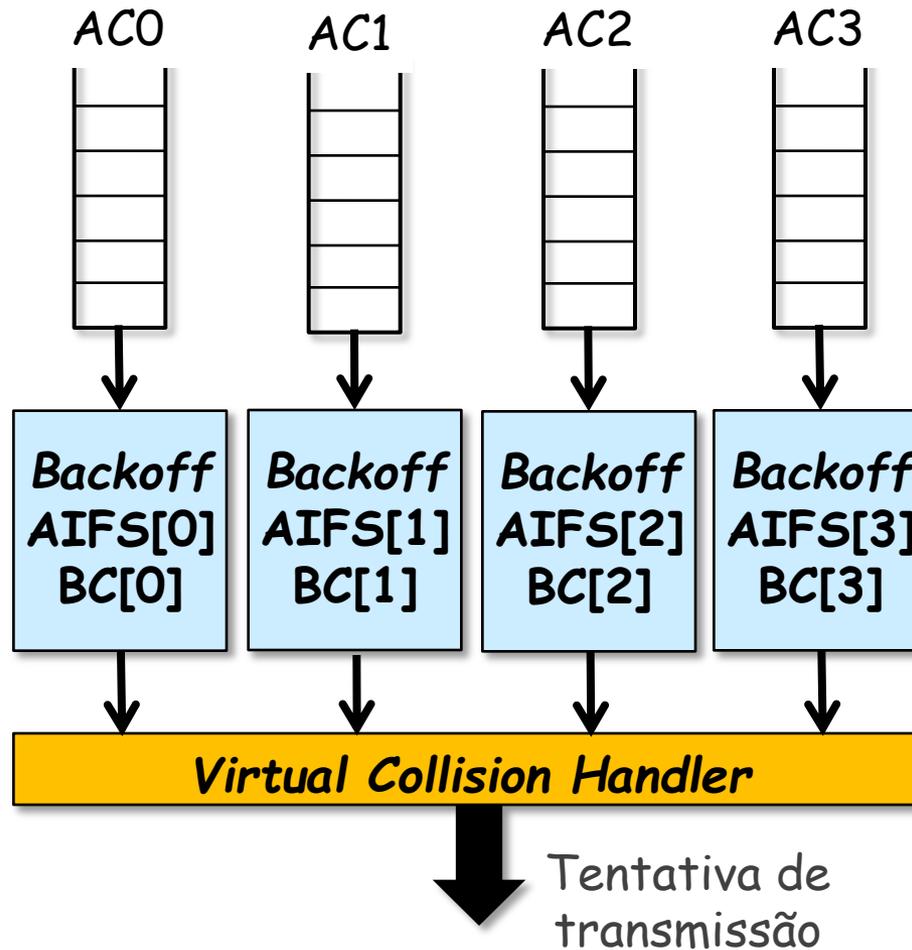
IEEE 802.11e - EDCA

- 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

IEEE 802.11e - EDCA

- 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

IEEE 802.11e - EDCA



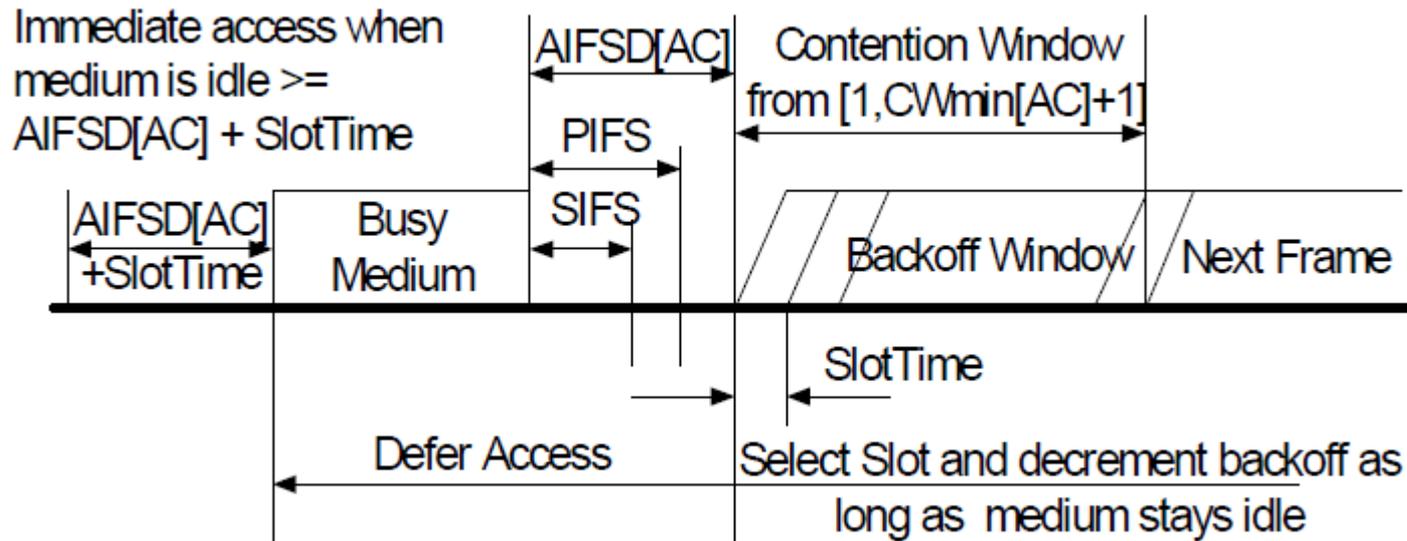
IEEE 802.11e - EDCA

BK = Background; BE = Best Effort; VI = Video; VO = Voice

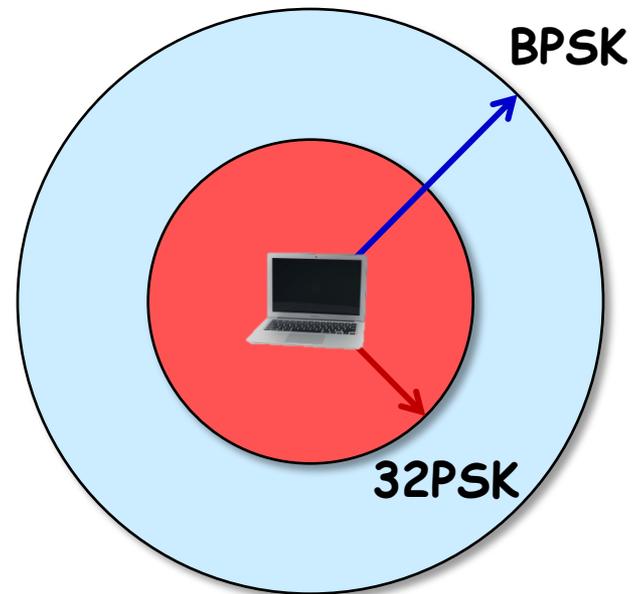
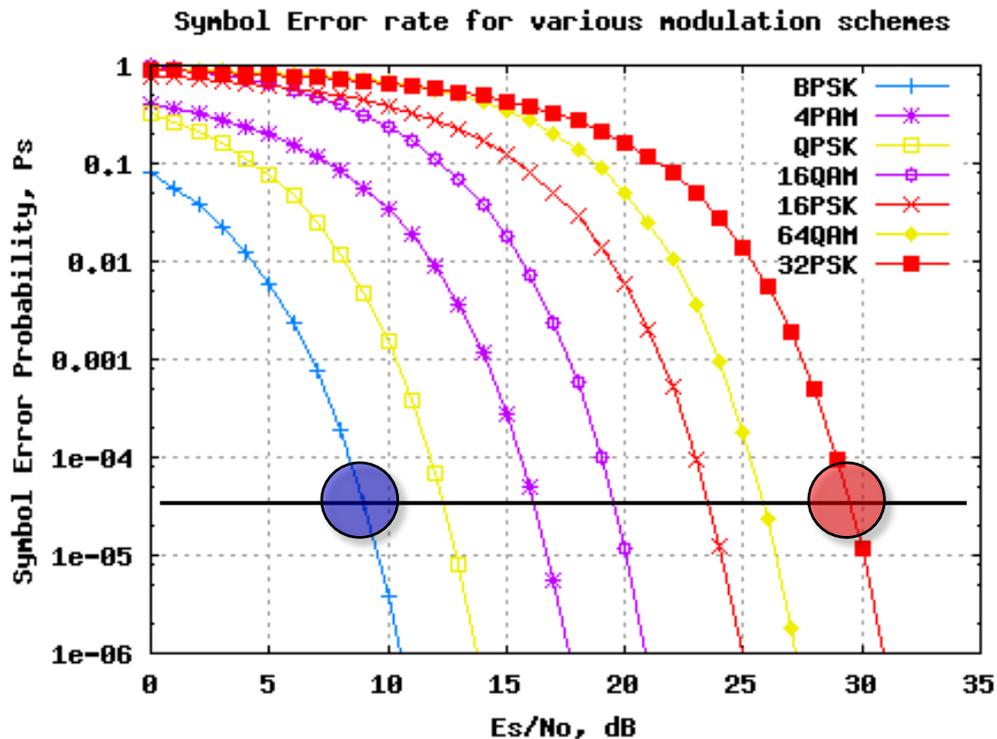
| AC | CW_{min} | CW_{max} | AIFSN | Limite de TXOP |
|----|------------------------|------------------------|-------|----------------|
| BK | CW_{min} | CW_{max} | 7 | 0 |
| BE | CW_{min} | CW_{max} | 3 | 0 |
| VI | $(CW_{min} + 1)/2 - 1$ | CW_{min} | 2 | 6,016 ms |
| VO | $(CW_{min} + 1)/4 - 1$ | $(CW_{min}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

$$AIFS = SIFSTime + AIFSN \times SlotTime$$

IEEE 802.11e - EDCA



Controle de Taxa



Controle de Taxa

- Auto Rate Fallback (ARF)
 - Um dos primeiros esquemas de adaptação de taxa para o IEEE 802.11
 - **Início:**
 - Transmissor começa a transmitir na taxa de dados mais baixa disponível (2 Mb/s no IEEE 802.11b) e dispara um temporizador
 - **Aumento da taxa de dados:**
 - Se o temporizador expirar ou se **N** transmissões consecutivas forem bem sucedidas, o transmissor aumenta a taxa de dados para a próxima disponível e reinicia o temporizador

Controle de Taxa

- Auto Rate Fallback (ARF)
 - Um dos primeiros esquemas de adaptação de taxa para o IEEE 802.11
 - **Redução da taxa de dados (fallback):**
 - Se a primeira transmissão após o aumento da taxa falhar, o transmissor retorna ao valor anterior da taxa
 - A taxa também é reduzida caso o transmissor falhe duas transmissões consecutivas
 - O ARF considera a taxa de perda de quadros como um indicativo das condições do canal e ajusta a taxa de transmissão baseada no sucesso das transmissões

Controle de Taxa

- Adaptive Auto Rate Fallback (AARF)
 - Diferente do ARF, o AARF ajusta dinamicamente o limiar N para aumento da taxa
 - **Início:**
 - Transmissor começa a transmitir na taxa de dados mais baixa disponível (2 Mb/s no IEEE 802.11b) e dispara um temporizador
 - **Aumento da taxa de dados:**
 - Transmissor aumenta a taxa de dados para a próxima taxa disponível após N transmissões bem sucedidas ou após o estouro do temporizador

Controle de Taxa

- Adaptive Auto Rate Fallback (AARF)
 - Diferente do ARF, o AARF ajusta dinamicamente o limiar N para aumento da taxa
 - **Redução da taxa de dados (fallback):**
 - Se a primeira transmissão após o aumento da taxa não for bem sucedida, o transmissor retorna ao valor anterior e duplica o valor do limiar para aumento de taxa
 - » Limiar possui valor máximo

O limiar adaptativo produz menos aumentos prematuros de taxa de transmissão e, por conseguinte, menores flutuações

Controle de Taxa

- Onoe
 - Um dos primeiros algoritmos de controle de taxa implementado em código aberto em driver do Linux
 - Implementado no driver MadWifi da Atheros
 - Algoritmo baseado em crédito
 - Tenta encontrar a melhor taxa com perda inferior a 50%
 - Ajusta a taxa de transmissão ao final de ciclos de 1000 ms (1s)
 - Baseia-se em estatísticas coletadas das transmissões
 - Onoe se torna insensível a rajadas e não-responsivo a mudanças bruscas das condições do canal

Controle de Taxa

- Onoe
 - Redução da taxa de transmissão:
 - Quando pacotes precisam, na média, de pelo menos uma retransmissão → Perda de 50%
 - Aumento da taxa de transmissão:
 - Quando menos de 10% dos pacotes requerem uma retransmissão

Controle de Taxa

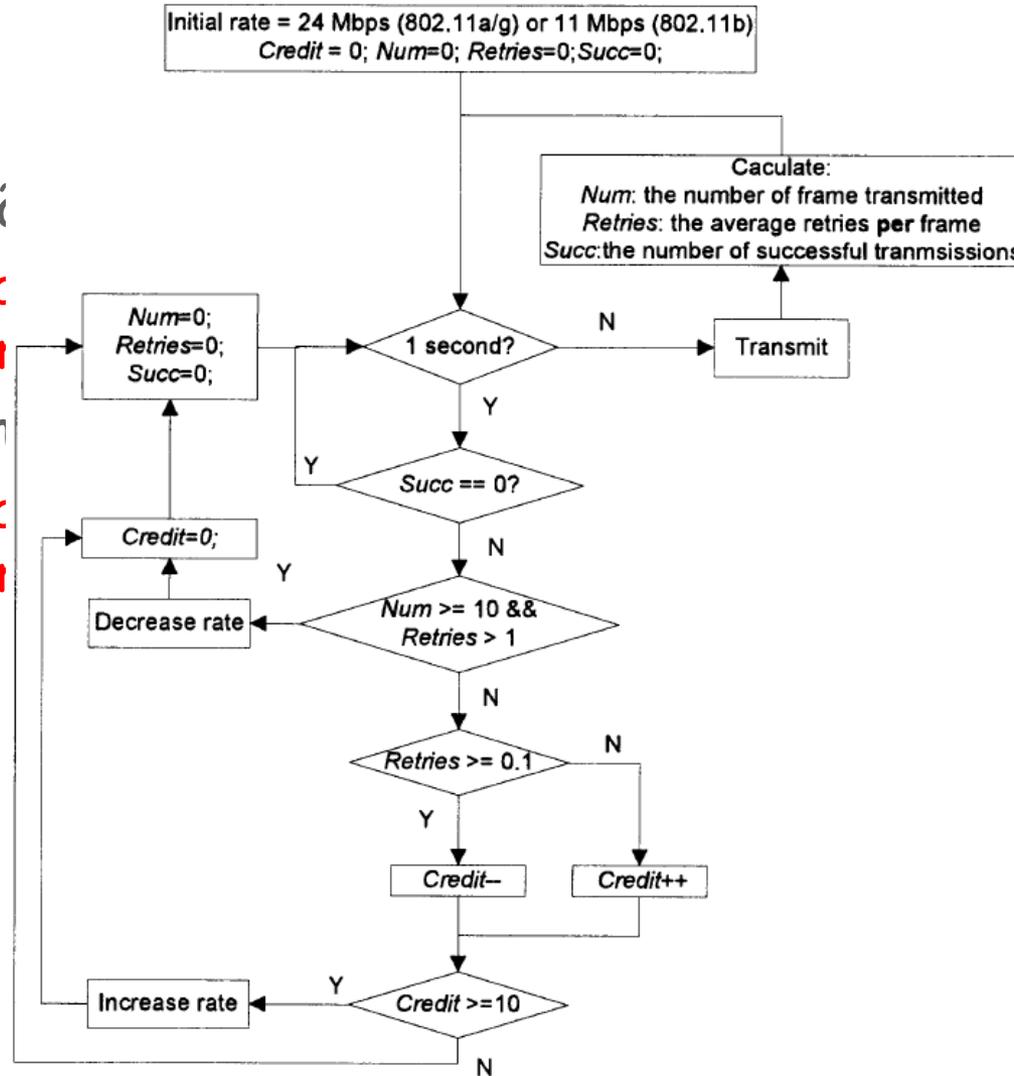
- Onoe

- Reduça

- Quic
 - reti

- Aumen

- Quic
 - reti



menos uma

uma

Controle de Taxa

- **SampleRate**
 - Baseado em estatísticas da última janela de tempo, assim como o Onoe
 - Ajusta a taxa àquela que atinge o **menor tempo médio de transmissão** na última janela de tempo de 10 segundos
 - Tempo de transmissão de um quadro = tempo de transmissão do quadro até o ACK, o que inclui possíveis retransmissões e backoff estipulado pelo IEEE 802.11

Não adianta transmitir em taxas elevadas se o tempo de transmissão leva em conta também o número de retransmissões

Controle de Taxa

- **SampleRate**
 - Baseado em estatísticas da última janela de tempo, assim como o Onoe
 - Ajusta a taxa àquela que atinge o **menor tempo médio de transmissão** na última janela de tempo de 10 segundos
 - **Início:**
 - Começa transmissão na taxa com menor tempo médio de transmissão na última janela de 10 segundos

Controle de Taxa

- **SampleRate**
 - Baseado em estatísticas da última janela de tempo, assim como o Onoe
 - Ajusta a taxa àquela que atinge o **menor tempo médio de transmissão** na última janela de tempo de 10 segundos
 - **Redução do tempo de transmissão:**
 - Reduz a taxa de transmissão após quatro transmissões consecutivas mal sucedidas
 - Calcula o tempo médio de transmissão a cada 10 quadros
 - Seleciona uma taxa diferente da atual para sondar tempos médios de transmissão inferiores em outras taxas

Controle de Taxa

- **SampleRate**
 - Baseado em estatísticas da última janela de tempo, assim como o Onoe
 - Ajusta a taxa àquela que atinge o **menor tempo médio de transmissão** na última janela de tempo de 10 segundos
 - **Aumento da taxa**
 - Ao final de 10 quadros seleciona aleatoriamente uma taxa diferente da atual com tempos menores de transmissão

Tempos de transmissão podem ser menores mesmo em taxas mais baixas!

Controle de Taxa

- Até aqui...
 - ARF, AARF, Onoe e SampleRate tomam decisão apenas com a visão local
- Será que é possível usar informações do destino? Ou do outro par?

Controle de Taxa

- Receiver Based Auto Rate (RBAR)
 - Primeira adaptação de taxa que se aproveita dos quadros RTS/CTS a serem enviados na taxa básica
 - Altera o padrão IEEE 802.11:
 - 1) Reserva do canal no cabeçalho RTS/CTS é representada pelo tamanho do pacote e taxa de dados ao invés de tempo de transmissão
 - 2) Cabeçalho RSH (*Reservation SubHeader*) proposto precede o quadro de dados para finalizar a informação da tentativa de reserva no CTS

Controle de Taxa

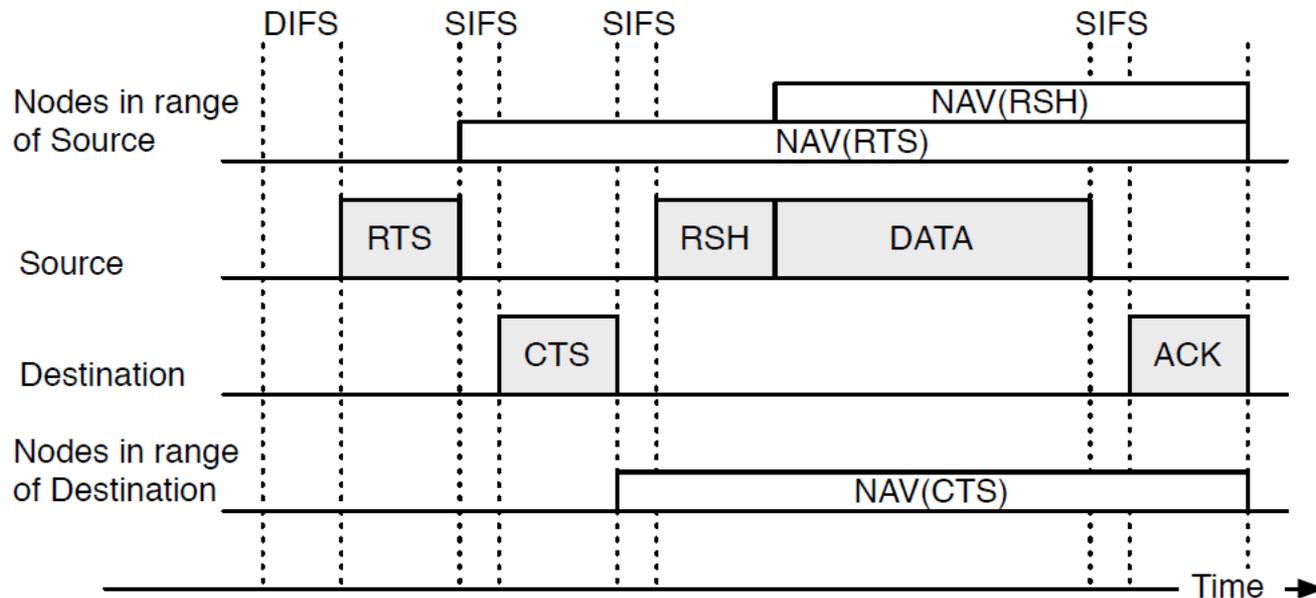
- Receiver Based Auto Rate (RBAR)
 - Estação transmissora escolhe uma taxa por heurística
 - Por exemplo, a última utilizada que resultou em uma transmissão bem sucedida
 - Inclui a taxa escolhida e o tamanho do pacote no RTS
 - Quando o destino recebe o RTS, ele pode obter a RSR da camada física e traduzir o valor encontrado para a taxa de dados
 - Logo a estação de destino embute a taxa de dados escolhida no cabeçalho do CTS

Controle de Taxa

- Receiver Based Auto Rate (RBAR)
 - Todas as estações que escutarem o CTS podem calcular o tempo de reserva do canal tentado
 - Ao receber a informação sobre a taxa de transmissão no CTS, a fonte tem a oportunidade de acertar a taxa a ser usada
 - RSH avisa a todos os vizinhos do transmissor sobre a taxa escolhida

Controle de Taxa

- Receiver Based Auto Rate (RBAR)



Controle de Taxa

- Opportunistic Auto Rate (OAR)
 - OAR sonda a taxa através da troca de RTS/CTS
 - Parecido com o RBAR
 - Diferente do RBAR...
 - Usa transmissões oportunistas de quadros de dados
 - Se o meio possui boas condições, procura-se explorá-lo com transmissões consecutivas

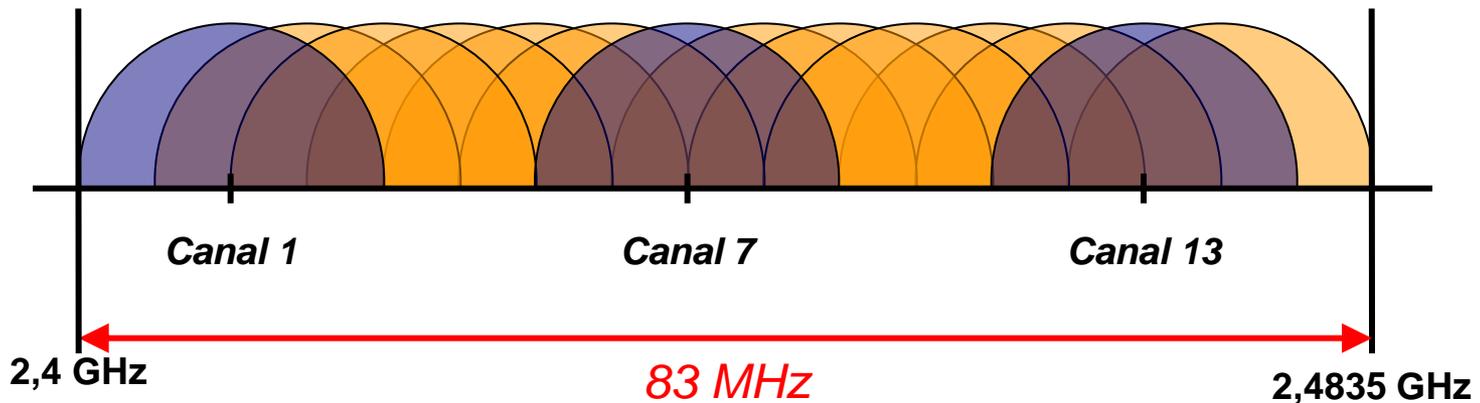
Requer justiça temporal ao invés de por pacote no acesso ao meio (pacotes a taxas mais altas ocupam menos o meio)

Controle de Taxa

- Opportunistic Auto Rate (OAR)
 - Operação:
 - Depois que a fonte escolhe uma taxa, ela transmite múltiplos quadros consecutivos dependendo da taxa selecionada
 - 5 quadros se a taxa for 11 Mb/s, 3 se for 5.5 Mb/s e 1 se for 2 Mb/s.
 - Múltiplos quadros **consecutivos** são enviados se servindo do mecanismo de fragmentação do IEEE 802.11.
 - Fragmentação reduz o tempo de acesso ao meio (envio de RTS/CTS + backoff) em comparação ao RBAR
 - Forma de aproveitar melhor as condições do meio...

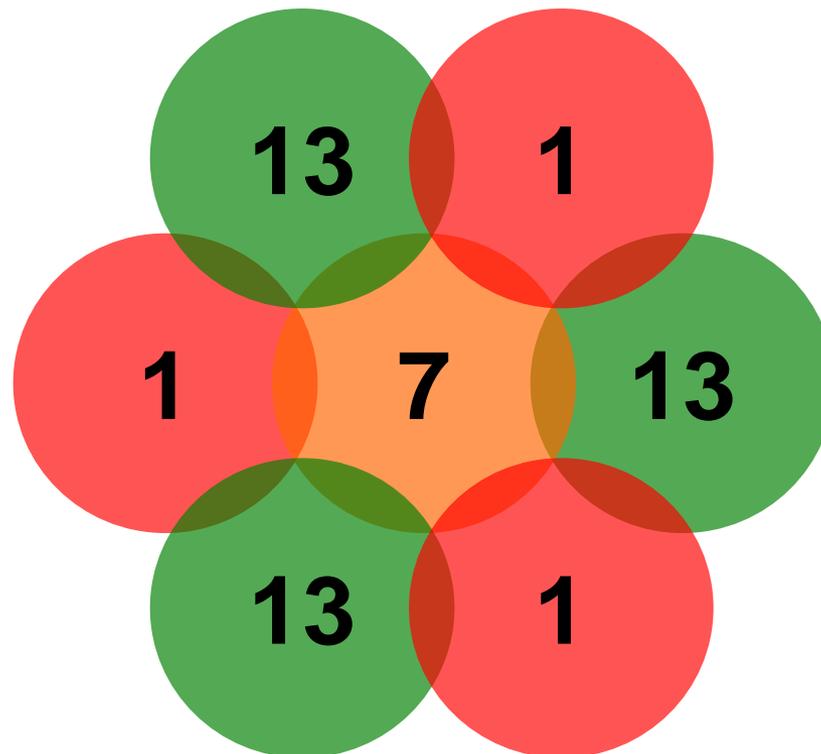
Múltiplos Canais

- Banda ISM
 - Banda dividida em 14 canais de 20 MHz cada um
 - Transmissão (entre origem e destino) em apenas 1 canal
 - Co-localização de 3 redes no mesmo espaço físico



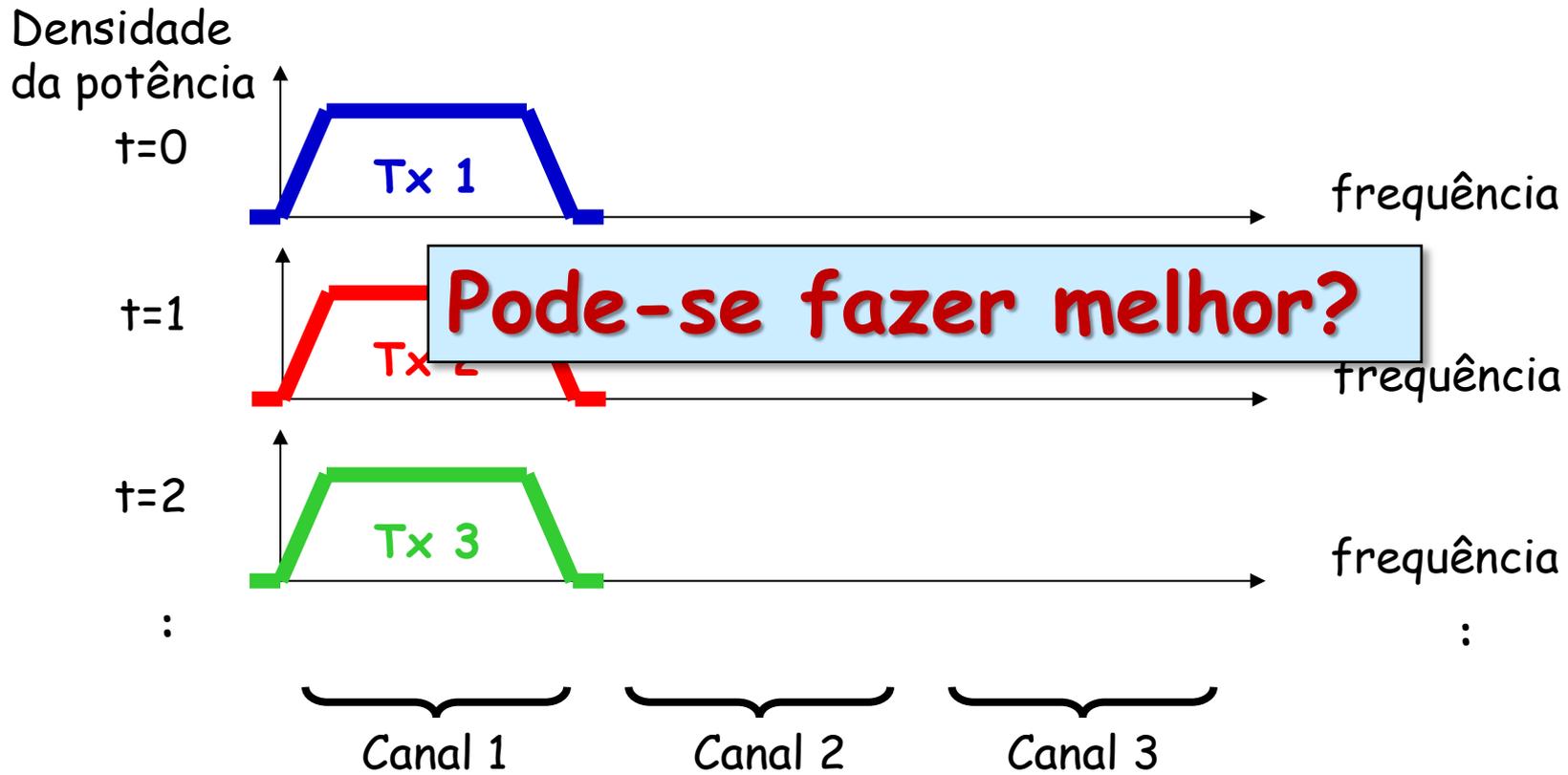
Múltiplos Canais

- **Desafio principal:** Alocar canais de modo a permitir maior reuso de frequências



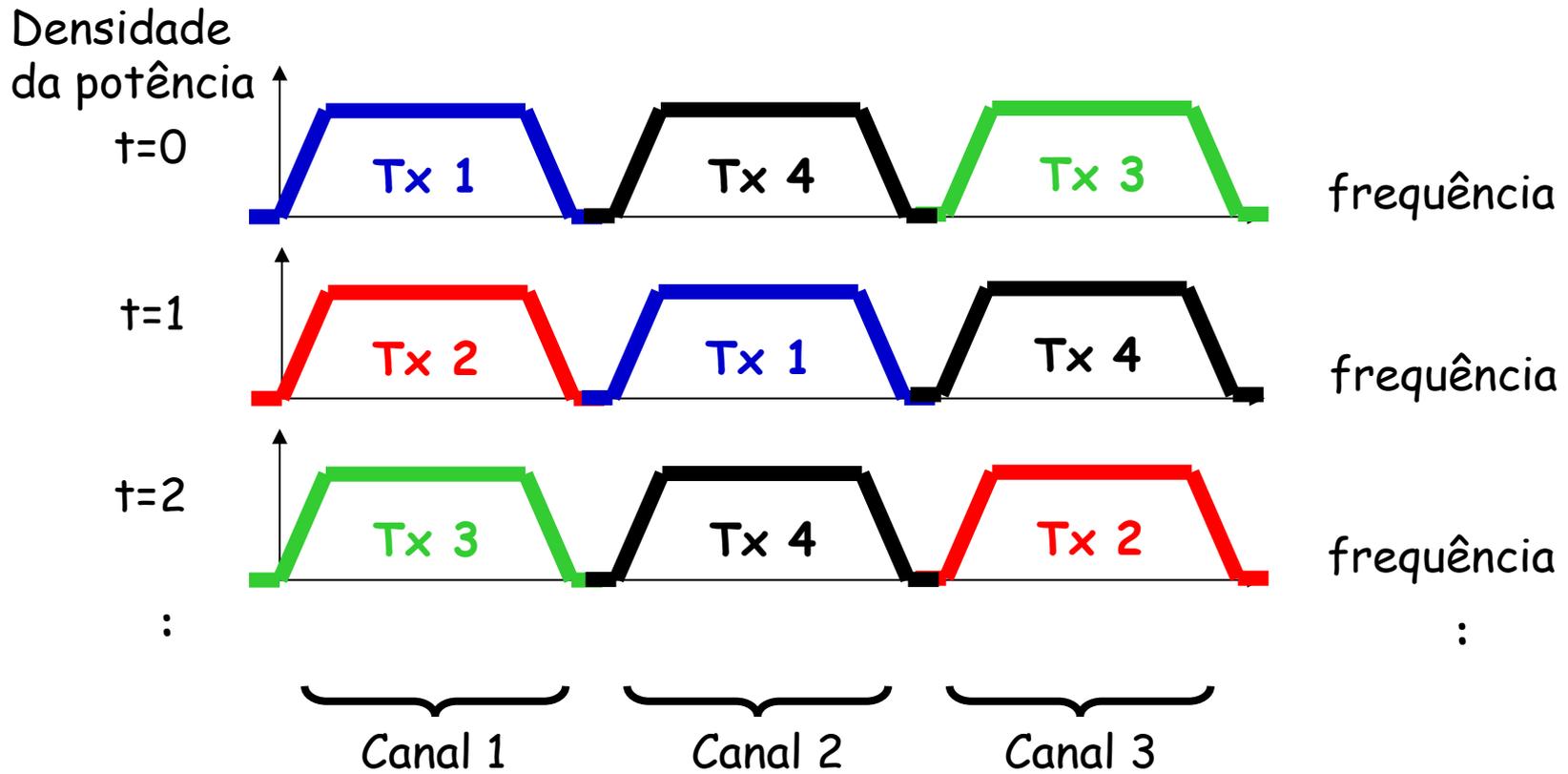
Redes Sem-fio Típicas

Cada rede usa apenas um canal (canal 1)



Redes Sem-fio Típicas

Envio simultâneo em canais diferentes!



Premissas para Uso de Múltiplos Canais

- Dada uma rede sem-fio...
 - Número de canais = $M \mid M > 1$
 - Cada nó tem uma interface com canal configurável
 - Cada nó tem mais de um vizinho
- Redes multi-canais
 - Aumentam a capacidade da rede
 - Reduzem o atraso médio
 - São mais robustas a interferências

Múltiplos Canais

- Redes infraestruturadas
 - Escolha do canal de cada BSS pode ser centralizada
 - Problema de otimização busca maximizar a capacidade da rede pelo reuso de canais
- Redes ad hoc
 - Ausência de infraestrutura obriga estações a realizar gerenciamento de canais de forma distribuída
 - Uso de mais de uma interface?
 - Uso do canal de controle fora ou dentro da banda?
 - Combinações das duas possibilidades anteriores?

Múltiplos Canais em Redes Ad Hoc

- Quatro abordagens identificadas:
 - Canal de controle dedicado
 - Sequência comum de salto
 - Rendezvous paralelo
 - Fase dividida

Canal de Controle Dedicado

- Estações têm **duas** interfaces
 - Uma interface é centrada em um canal dedicado para todas as mensagens de controle
 - Outra interface é centrada em um canal diferente, selecionado dinamicamente para dados

Canal de Controle Dedicado

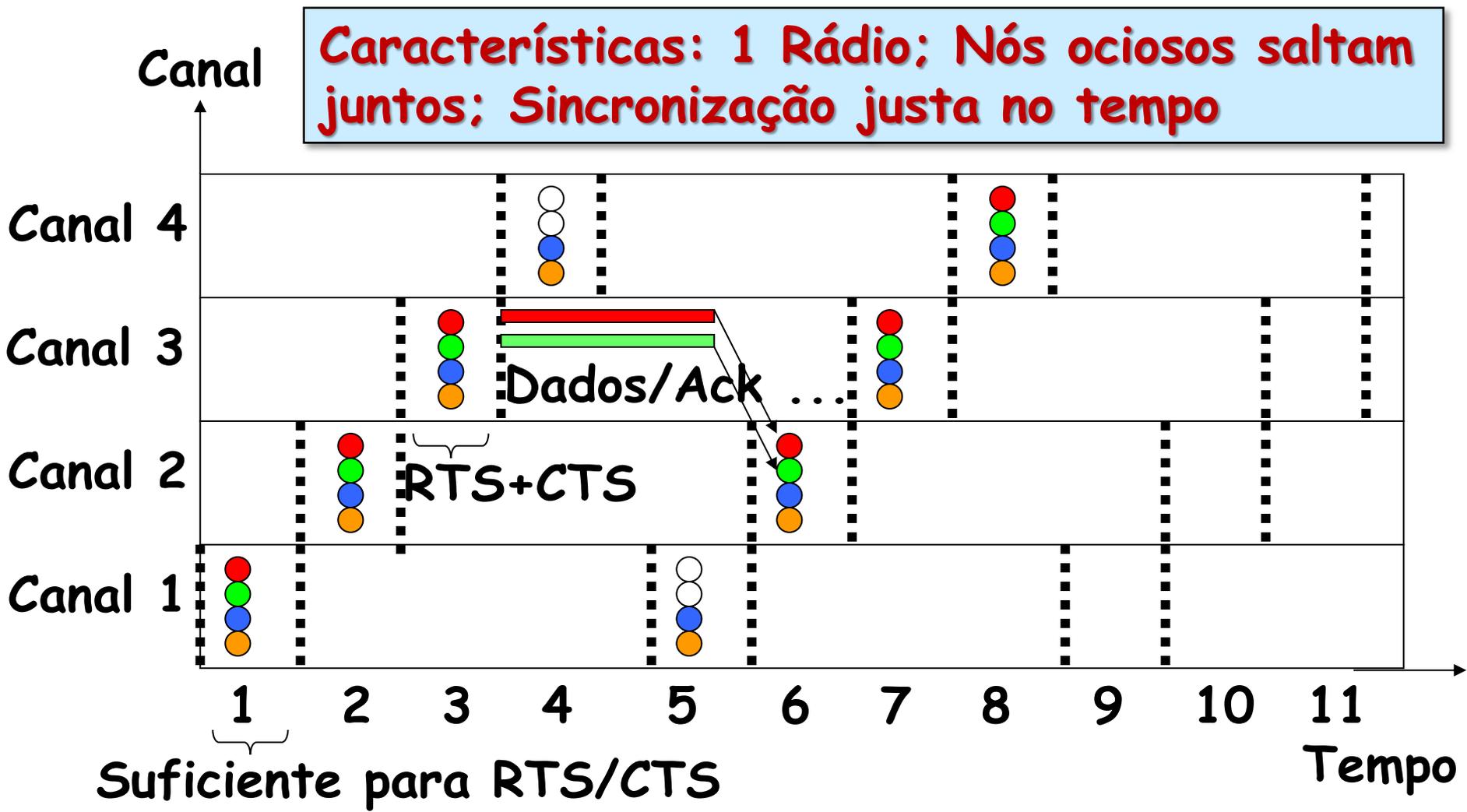
Características: 2 Rádios/Nó;
Rendezvous no canal 1; Sem sincronização



Sequência Comum de Salto

- Estações têm uma interface
 - Todas as estações ociosas saltam entre todos os canais até decidirem se comunicar em um dos canais que esteja ocioso
 - Enquanto estiverem se comunicando, o canal é mantido

Sequência Comum de Salto



Rendezvous Paralelo

- Estações têm uma interface
 - Cada estação salta entre canais de forma aleatória durante período de ociosidade
 - Nós que queiram trocar dados devem se encontrar em um canal
 - Nós que estejam trocando dados permanecem no mesmo canal até que a transmissão se encerre

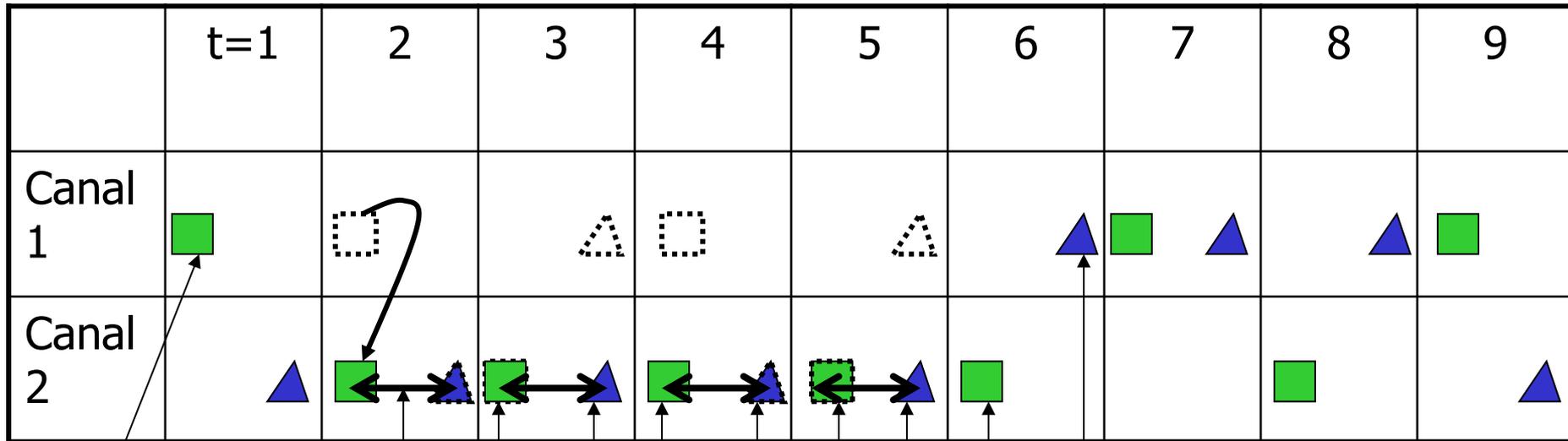
Rendezvous Paralelo

▲ ■ Agendamento original

| | t=1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|---------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Canal 1 | ■ | ■ | ▲ | ■ | ▲ | ▲ | ■ | ▲ | ▲ | ■ |
| Canal 2 | ▲ | ▲ | ■ | ▲ | ■ | ■ | | ■ | | ▲ |

Rendezvous Paralelo

△ □ Agendamento original



1. Chegada dos dados

2. RTS/ CTS/ Dados

3. Saltos páram durante transferência de dados

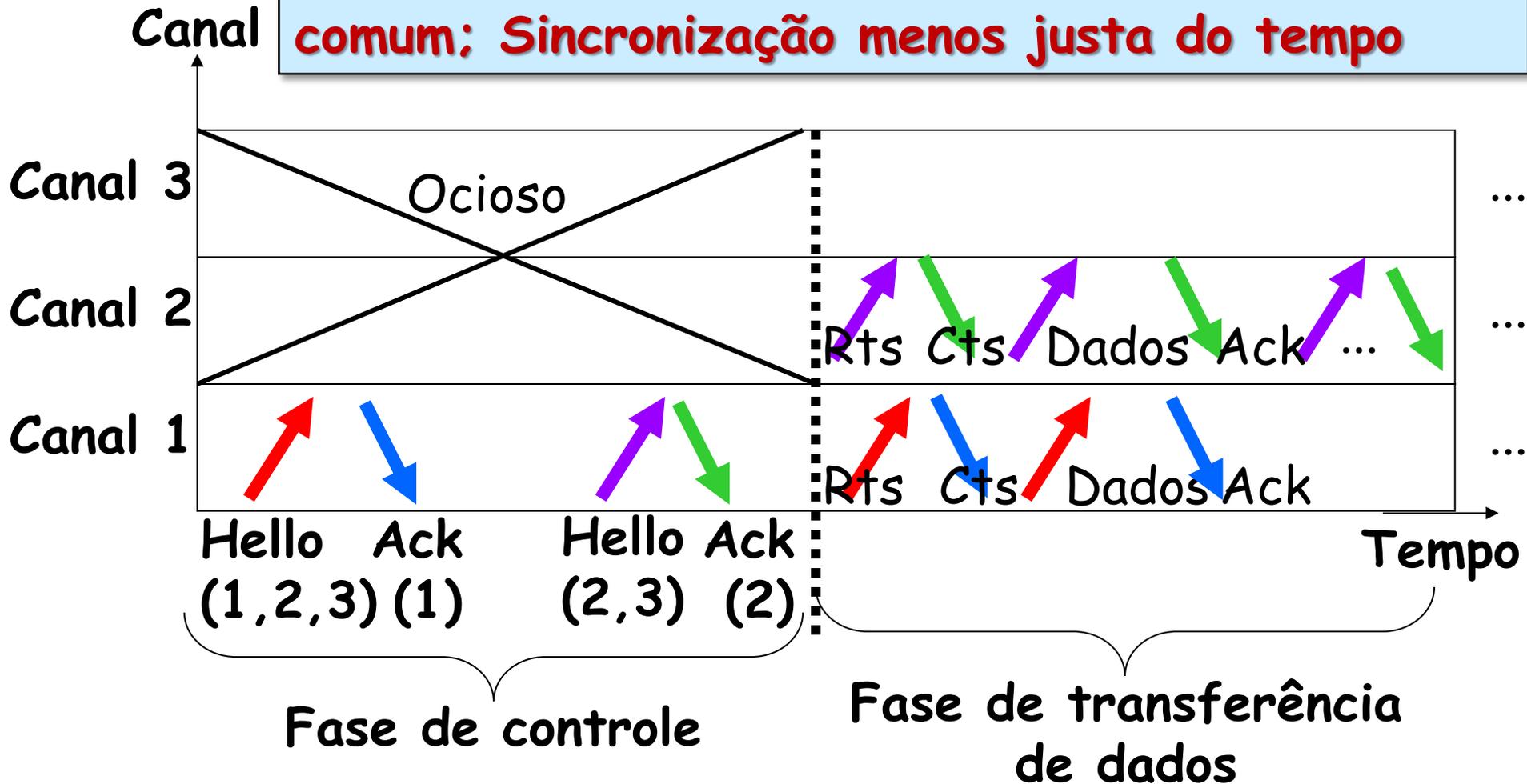
4. Reinício dos saltos

Fase Dividida

- Estações têm **uma interface**
 - Estações dividem o tempo entre fases de controle e de troca de dados
 - **Fase de controle:** Todas as estações estão sintonizadas no mesmo canal
 - **Fase de dados:** Cada par seleciona o melhor canal até a próxima fase de controle

Fase Dividida

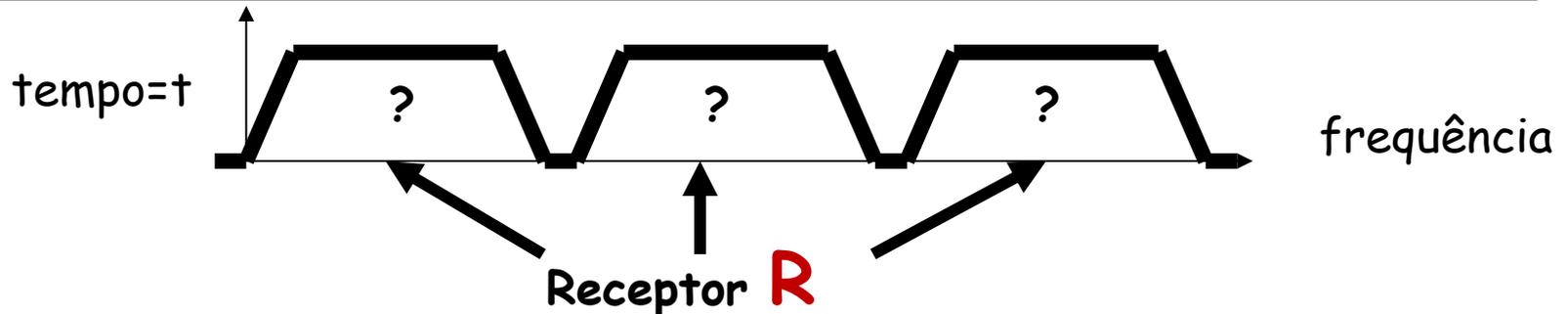
Características: 1 Rádio; Rendezvous num canal comum; Sincronização menos justa do tempo



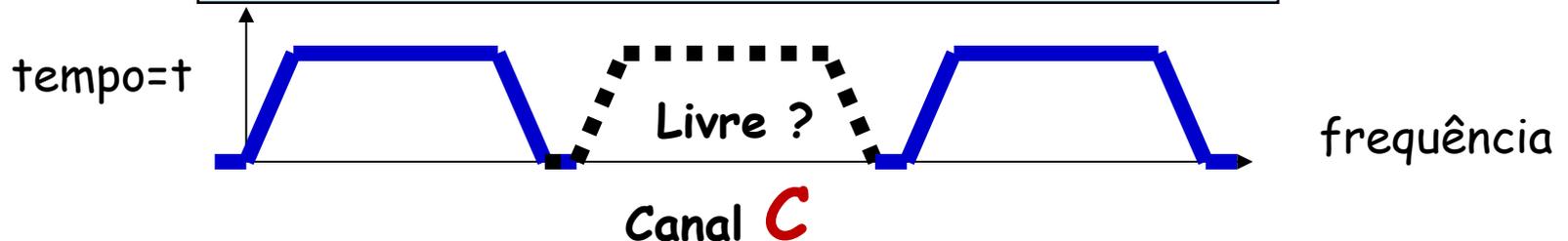
Problemas dos Múltiplos Canais em Redes Ad Hoc

- No fundo, o problema é sempre o mesmo...

P1: R está escutando em qual canal?



P2: O canal C está livre?



Problemas dos Múltiplos Canais em Redes Ad Hoc

- **P1: R está escutando em qual canal?**
 - Problema de atribuição de canal
 - Define quais canais são utilizados por quais estações
- **P2: O canal C está livre?**
 - Problema do método de acesso ao meio
 - Resolve problema de contenção/colisão em um dado canal

Problemas dos Múltiplos Canais em Redes Ad Hoc

- **P1: R está escutando em qual canal?**
 - Problema de atribuição de canal
 - Define quais canais são utilizados por quais estações
- **P2: O canal C está livre?**
 - Problema do método de acesso ao meio
 - Resolve problema de contenção/colisão em um dado canal

Dinâmica da rede torna o problema mais complexo

Canal de Controle Dedicado

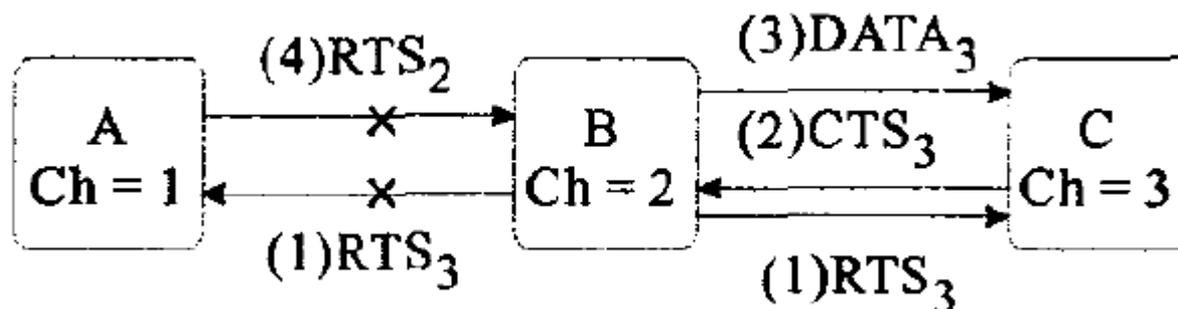
- Ex. Dynamic Channel Assignment (DCA) - Alocação Dinâmica do Canal

Alocação Dinâmica do Canal

- Assume o uso de duas interfaces por estação
 - Reserva o meio com RTS/CTS
 - Evita sincronismo de relógio entre as estações sem-fio
 - Atribui canal sob demanda às estações

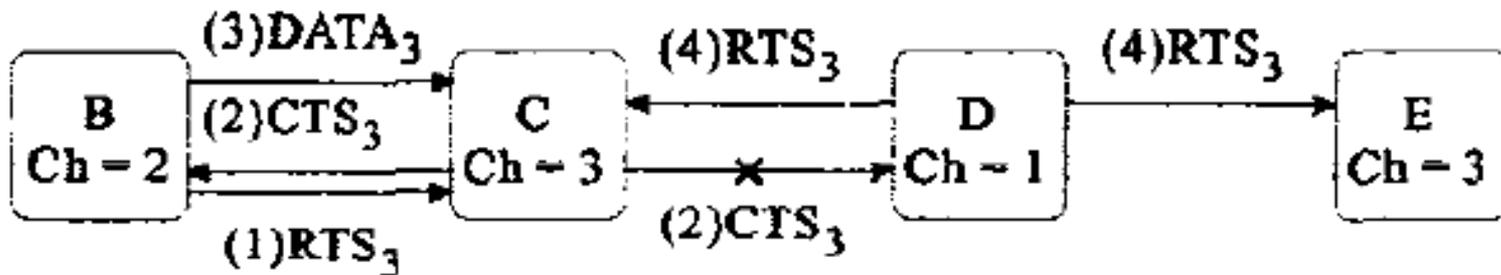
Alocação Dinâmica do Canal

- Problema do terminal **escondido** em redes multicanais
 - Estação A escuta o canal 1
 - Logo, não escuta o RTS enviado por B para C no canal 3
 - Estação A envia RTS no canal 2 pois não escuta a portadora no canal 3
 - Como B está ocupado enviando mensagens, o RTS não é respondido
 - A retransmite o RTS até que o número máximo de tentativas se esgote...



Alocação Dinâmica do Canal

- Problema do terminal **exposto** em redes multicanais
 - Estação C escuta o canal 3
 - Logo, escuta o RTS enviado por B também no canal 3
 - Estação C recebe RTS de B e envia CTS no canal 3
 - Como D não escuta o canal 3, ele ignora o CTS de C
 - Estação D envia RTS no canal 3
 - Causa colisão em C e, mesmo considerando que o destino é a estação E, colisão aconteceria com o envio de dados de D, já que E está no mesmo canal 3



Alocação Dinâmica do Canal

- Considerando N canais existentes...
 - $N-1$ canais são usados para transmissão de dados
 - Todos equivalentes e com a mesma capacidade
 - São usados para transmissão de pacotes de dados e reconhecimentos positivos
 - 1 (um) dos canais é reservado para controle
 - Resolve problema de contenção nos canais de dados
 - Atribui canais de dados às estações sem-fio

Alocação Dinâmica do Canal

- Cada estação mantém duas estruturas de dados:
 - Lista (`CUL[]`) contendo informações sobre uso dos canais
 - Cada elemento da lista é uma tupla contendo:
 - `CUL[i].host`: vizinho do nó atual
 - `CUL[i].ch`: canal de dados usado por `CUL[i].host`
 - `CUL[i].rel_time`: momento de liberação do canal por parte do `CUL[i].host`
 - A lista `CUL` é mantida de forma distribuída
 - `FCL` é a lista de canais livres
 - Computada dinamicamente a partir da `CUL`

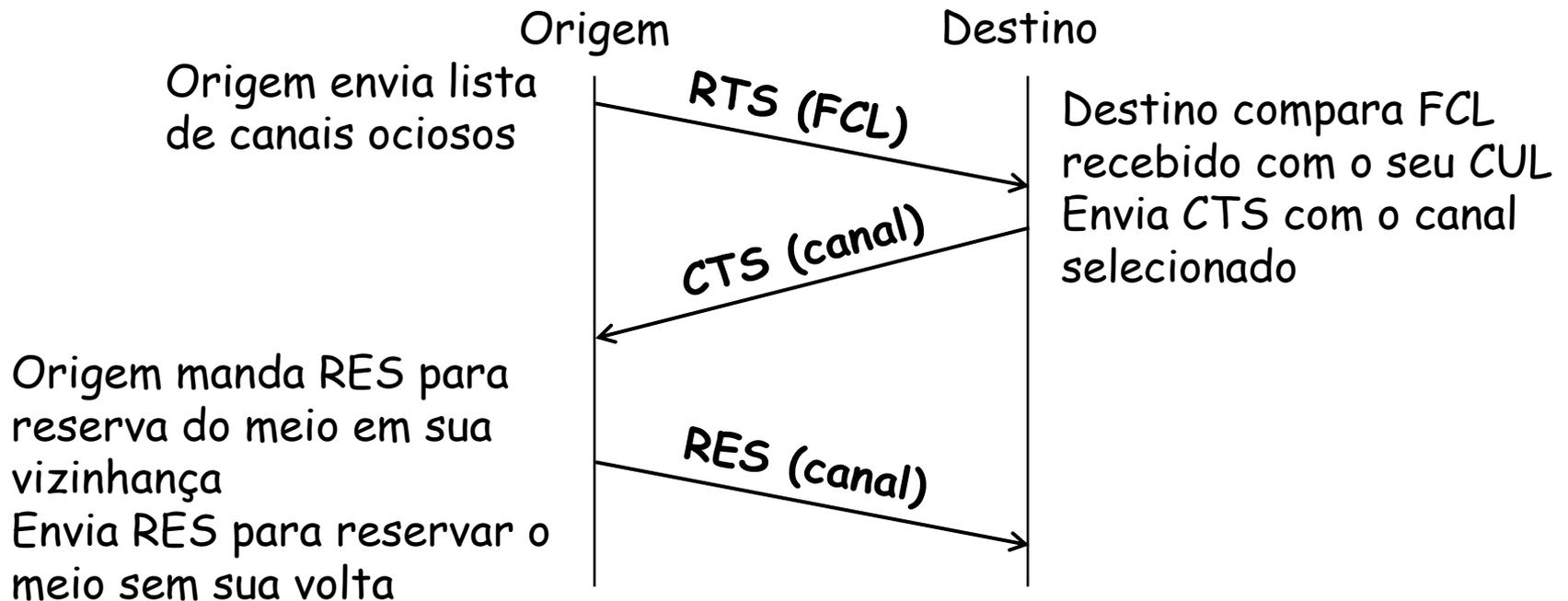
Alocação Dinâmica do Canal

- Operação no canal de controle:
 - A envia para B um RTS
 - RTS contém o FCL de A
 - B compara o FCL recebido com a sua lista CUL
 - Busca um canal de dados, caso exista, para ser usado nas comunicações seguintes
 - Responde para A com um CTS, inibindo os vizinhos de B de acessar o meio
 - A recebe o CTS de B
 - Envia um RES para inibir a sua vizinhança a usar o mesmo canal, inibindo os vizinhos de A a acessar o meio

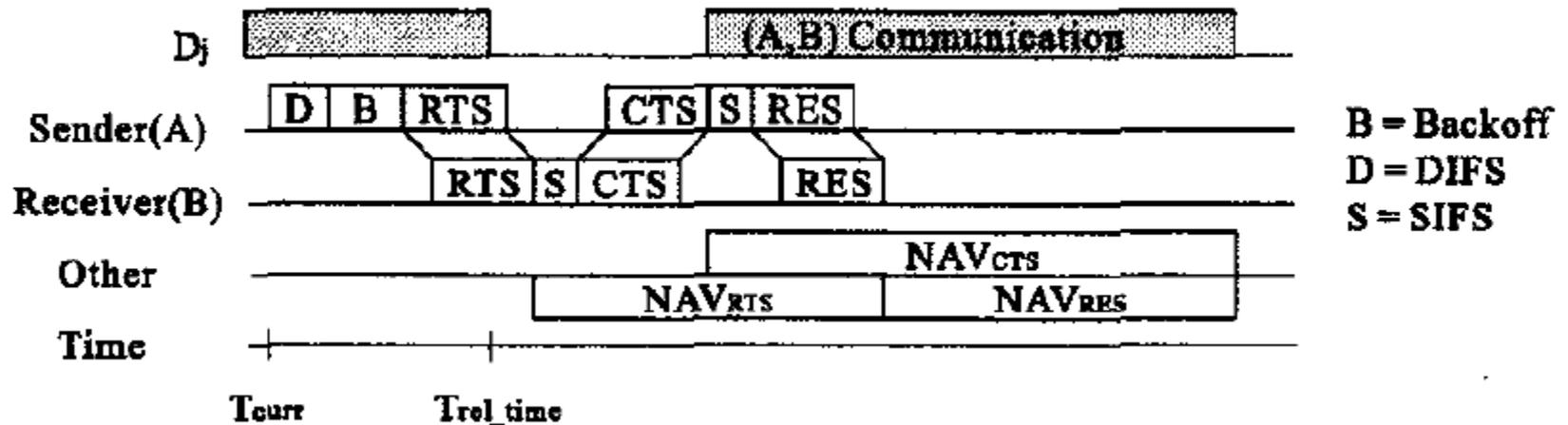
Alocação Dinâmica do Canal

- Operação no canal de dados:
 - Após reserva do meio através do canal de controle...
 - Todos os pacotes de dados são transmitidos no canal de dados

Alocação Dinâmica do Canal



Alocação Dinâmica do Canal



Fase Dividida

- Ex. Multi-channel MAC (MMAC) - MAC Multicanal

MAC Multicanal

- Protocolo Multi-channel MAC (MMAC) assume que:
 - Há N canais com mesma largura de banda que não causam interferência entre si
 - *As estações conhecem os canais disponíveis à priori*
 - Cada estação tem uma interface que ora está escutando ora está transmitindo no canal selecionado
 - Cada estação tem um transceiver que pode mudar de canal dinamicamente
 - Nós são sincronizados a partir de *beacons* enviados através de um canal de controle

MAC Multicanal

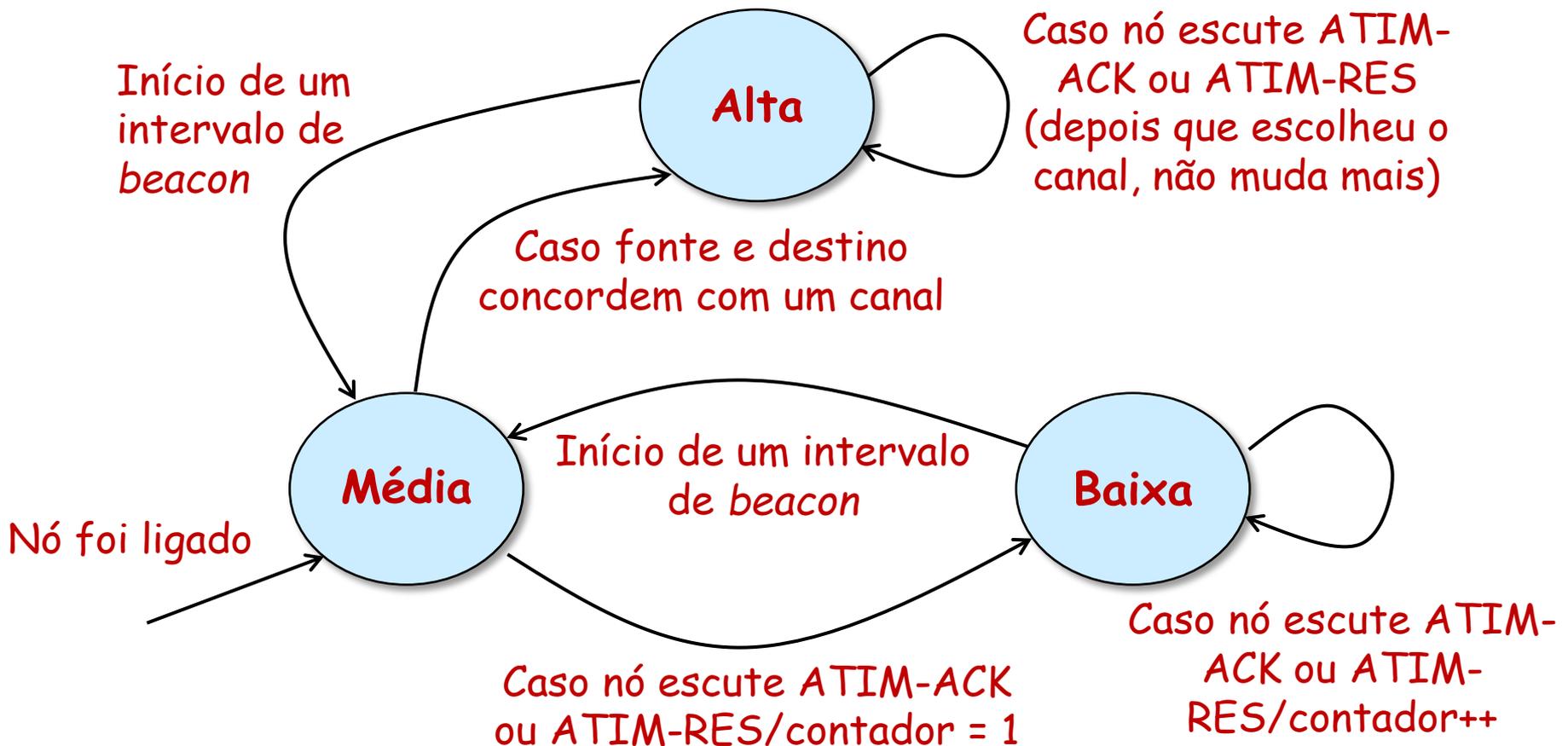
- Operação do MMAC:
 - Cada nó mantém uma estrutura de dados contendo a lista de canais preferidos (*Preferable Channel List - PCL*)
 - Indica o canal preferido do nó
 - Mantém o estado de uso dos canais na vizinhança do nó

MAC Multicanal

- Operação do MMAC:
 - Baseado nas informações da PCL, os canais são classificados em três estados:
 - **Preferência alta:** Canal já foi selecionado pelo próprio nó no intervalo atual de *beacon*
 - **Preferência média:** Canal que ainda não foi selecionado na vizinhança do nó
 - **Preferência baixa:** Canal que já foi selecionado por pelo menos um vizinho do nó

MAC Multicanal

- Mudança de estados dos canais



MAC Multicanal

- Negociação de canais
 - Canais são negociados pelas estações origem-destino durante a janela ATIM
 - Janela localizada no início do intervalo entre *beacons*
 - Mesma janela usada para economia de recursos
 - Todas as estações devem escutar o mesmo canal padrão (canal de controle) durante a janela ATIM
 - Canal de controle é definido à priori
 - *Beacons* e pacotes ATIM são enviados no canal de controle
 - Fora da janela ATIM, o canal de controle também é usado para dados

MAC Multicanal

- Negociação de canais
 - Canais são negociados pelas estações origem-destino durante a janela ATIM
 - Janela localizada no início do intervalo entre *beacons*

A negociação de canais requer que sincronismo seja tanto no tempo quanto na frequência

- Canal de controle é definido a priori
- *Beacons* e pacotes ATIM são enviados no canal de controle
- Fora da janela ATIM, o canal de controle também é usado para dados

MAC Multicanal

- Negociação de canais
 - Negociação é disparada caso um nó de origem tenha quadros a enviar a um nó de destino
 - Nó de origem primeiro envia a sua PCL em um pacote ATIM para o nó de destino
 - Nó de destino escolhe um canal baseado na PCL recebida e na própria PCL
 - PCL do destino tem maior prioridade
 - O canal escolhido pelo nó de destino é enviado em um pacote ATIM-ACK ao nó de origem
 - Caso o nó de origem aceite o canal selecionado, ele envia um pacote de reserva (ATIM-RES) ao nó de destino
 - Pacote ATIM-RES não existe no modo PS do IEEE 802.11

MAC Multicanal

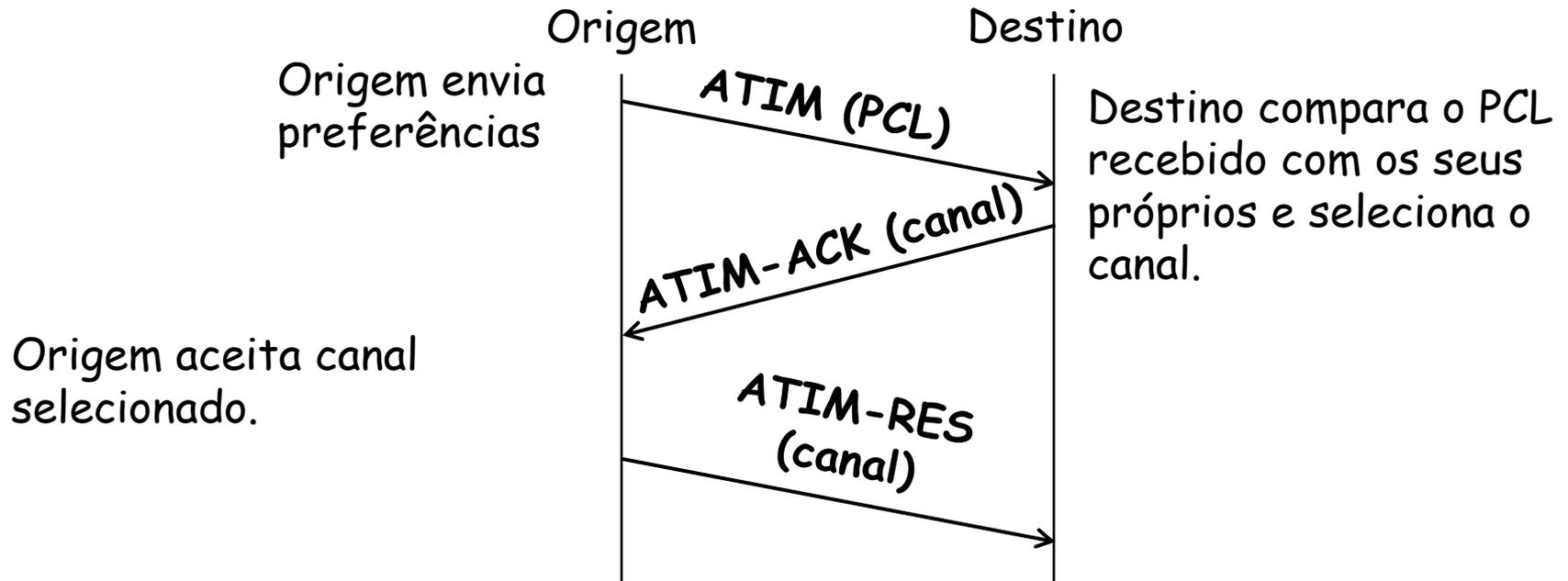
- Negociação de canais
 - Negociação é disparada caso um nó de origem tenha quadros a enviar a um nó de destino

Depois da janela ATIM, origem e destino mudam para o canal selecionado e começam a comunicação com RTS/CTS

- O canal escolhido pelo nó de destino é enviado em um pacote ATIM-ACK ao nó de origem
- Caso o nó de origem aceite o canal selecionado, ele envia um pacote de reserva (ATIM-RES) ao nó de destino
 - Pacote ATIM-RES não existe no modo PS do IEEE 802.11

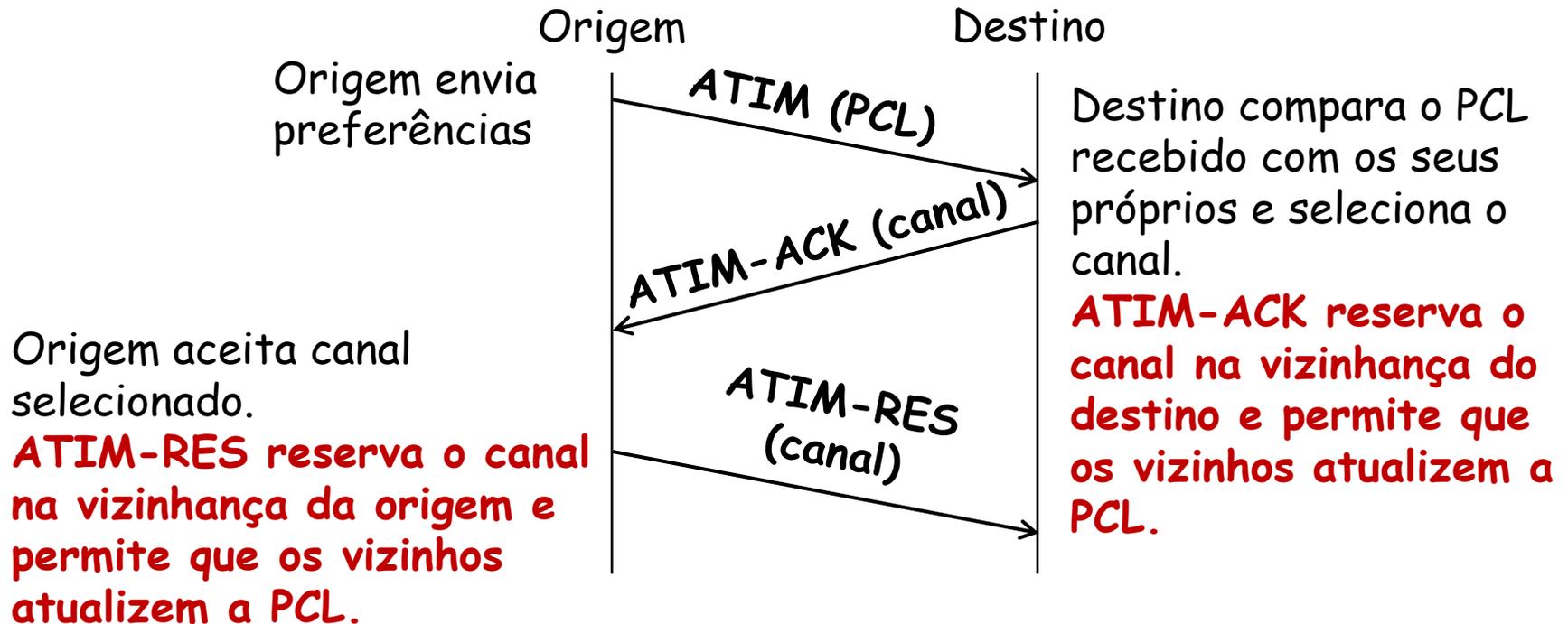
MAC Multicanal

- Qual o objetivo do novo pacote ATIM-RES além de confirmar o canal selecionado pelo nó de destino?



MAC Multicanal

- Qual o objetivo do novo pacote ATIM-RES além de confirmar o canal selecionado pelo nó de destino?



MAC Multicanal

- Caso o nó de origem não concorde com o canal selecionado pelo destino...
 - Nó de origem deve manter os quadros armazenados e esperar uma nova janela ATIM para renegociar o canal
- Caso mais de um par origem-destino enviem pacotes ATIM na mesma janela...
 - Colisões devem ser evitadas usando backoff com janela entre $[0, CW_{\min}]$
 - ATIM e ATIM-ACK incluem informações (NAV) para evitar terminal escondido

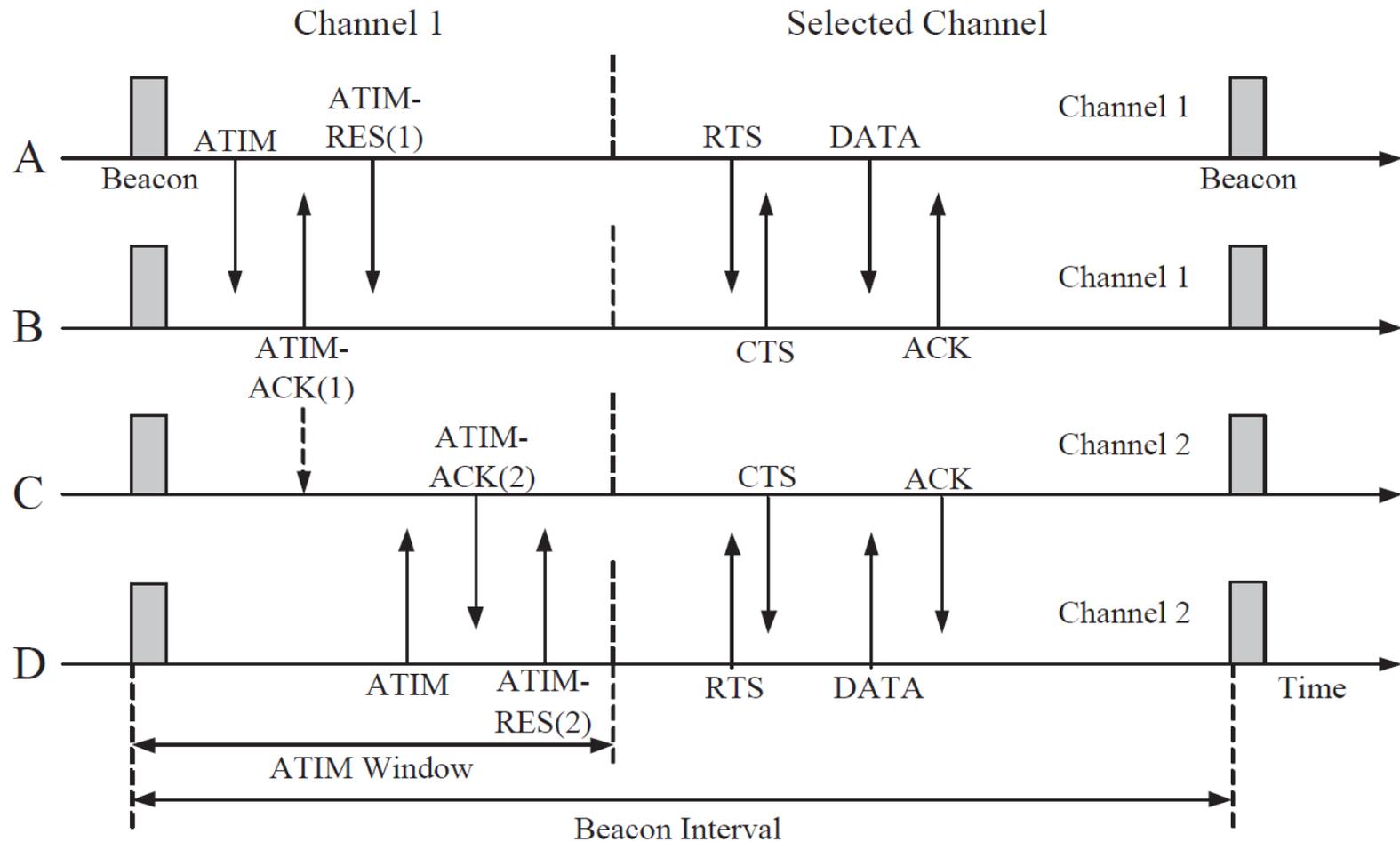
MAC Multicanal

- Caso mais de um par origem-destino selecionem o mesmo canal para envio de dados no mesmo intervalo de *beacon*...
 - Colisões devem ser evitadas usando backoff como no IEEE 802.11 tradicional
 - Estações entram em contenção, usando RTS/CTS
- Há compatibilidade natural entre o uso dos múltiplos canais e o modo de economia de energia
 - Nós podem dormir se não tiverem quadros de dados a enviar ou receber em um dado intervalo entre *beacons*

MAC Multicanal

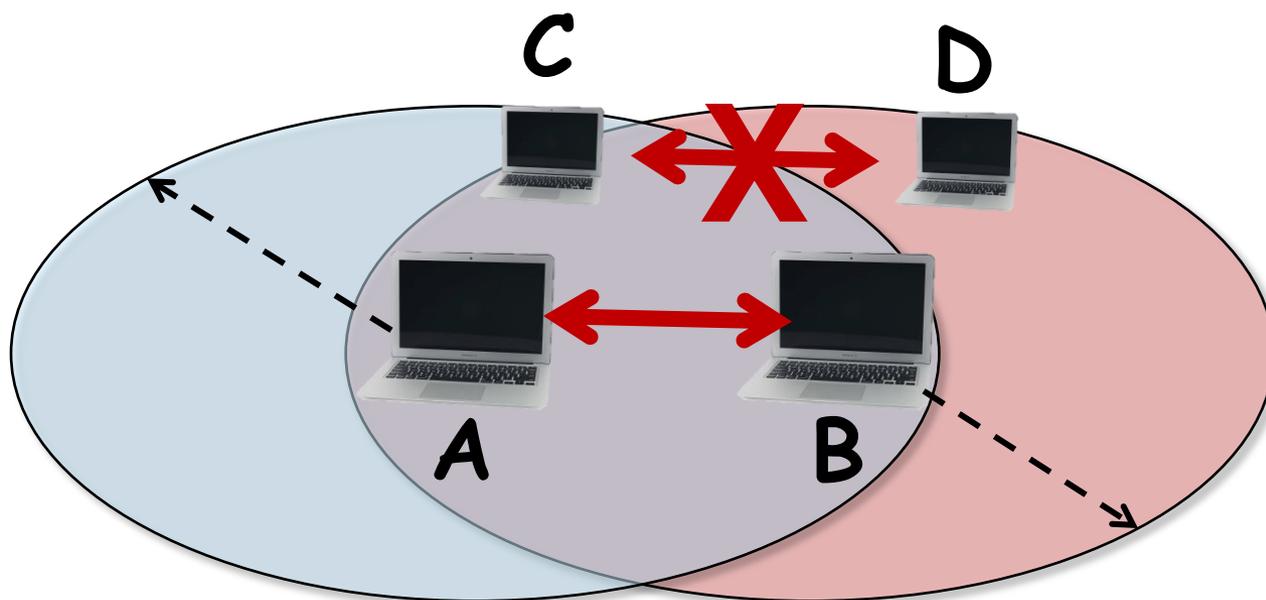
- Seleção do canal
 - Tenta balancear o uso de todos os canais disponíveis
 - Reuso de canais permite menor tempo de contenção por parte das estações
 - Usa um contador para controlar número de comunicações que ocorrem em cada canal
 - Toda vez que um ATIM-ACK e ATIM-RES é enviado, as estações vizinhas inicializam ou incrementam o contador do canal utilizado
 - Contador é usado como critério de seleção caso todos os canais já tenham sido selecionados na janela de beacon - **Preferência BAIXA**

MAC Multicanal



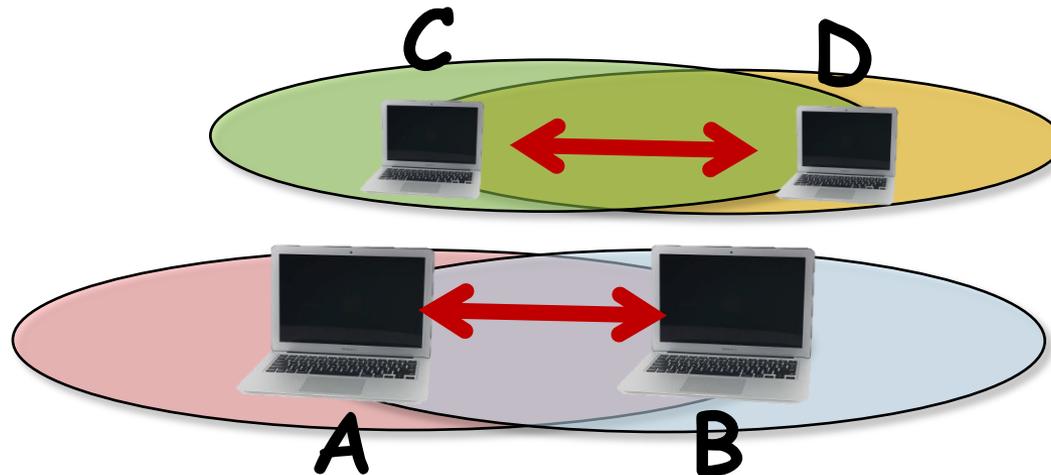
Antenas Direcionais

- Permite maior reuso espacial e maior alcance
 - AB reservam o canal usando antenas omnidirecionais
 - CD não podem acessar o meio ao mesmo tempo que AB



Antenas Direcionais

- Permite maior reuso espacial e maior alcance
 - AB reservam o canal usando antenas direcionais
 - CD podem acessar o meio ao mesmo tempo que AB



Antenas Direcionais

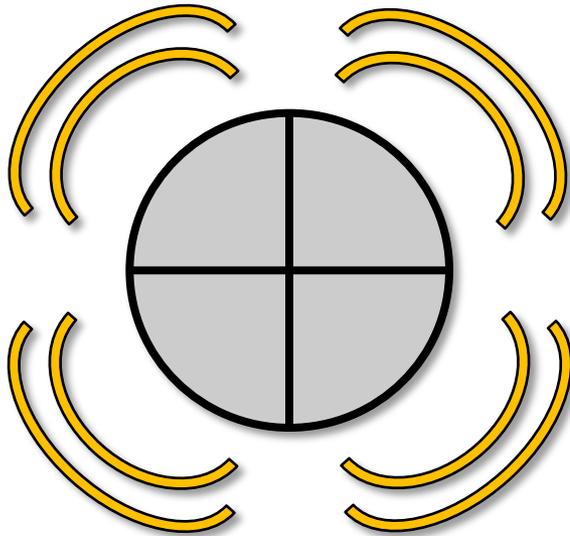
- Protocolos podem explorar as antenas direcionais durante:
 - Reserva do meio: RTS/CTS
 - Transmissão dos dados

Combinações de antenas omnidirecionais e direcionais podem ser usadas na reserva do meio e na transmissão dos dados

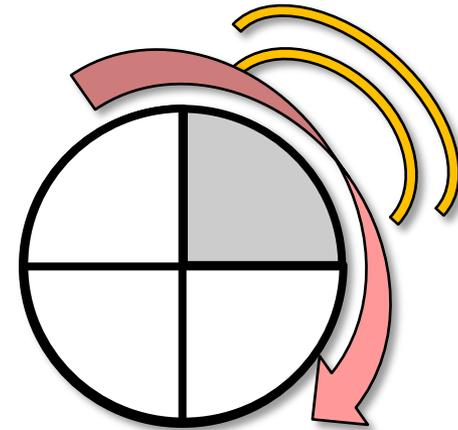
Antenas Direcionais

- Duas formas de operação:

Estáticas

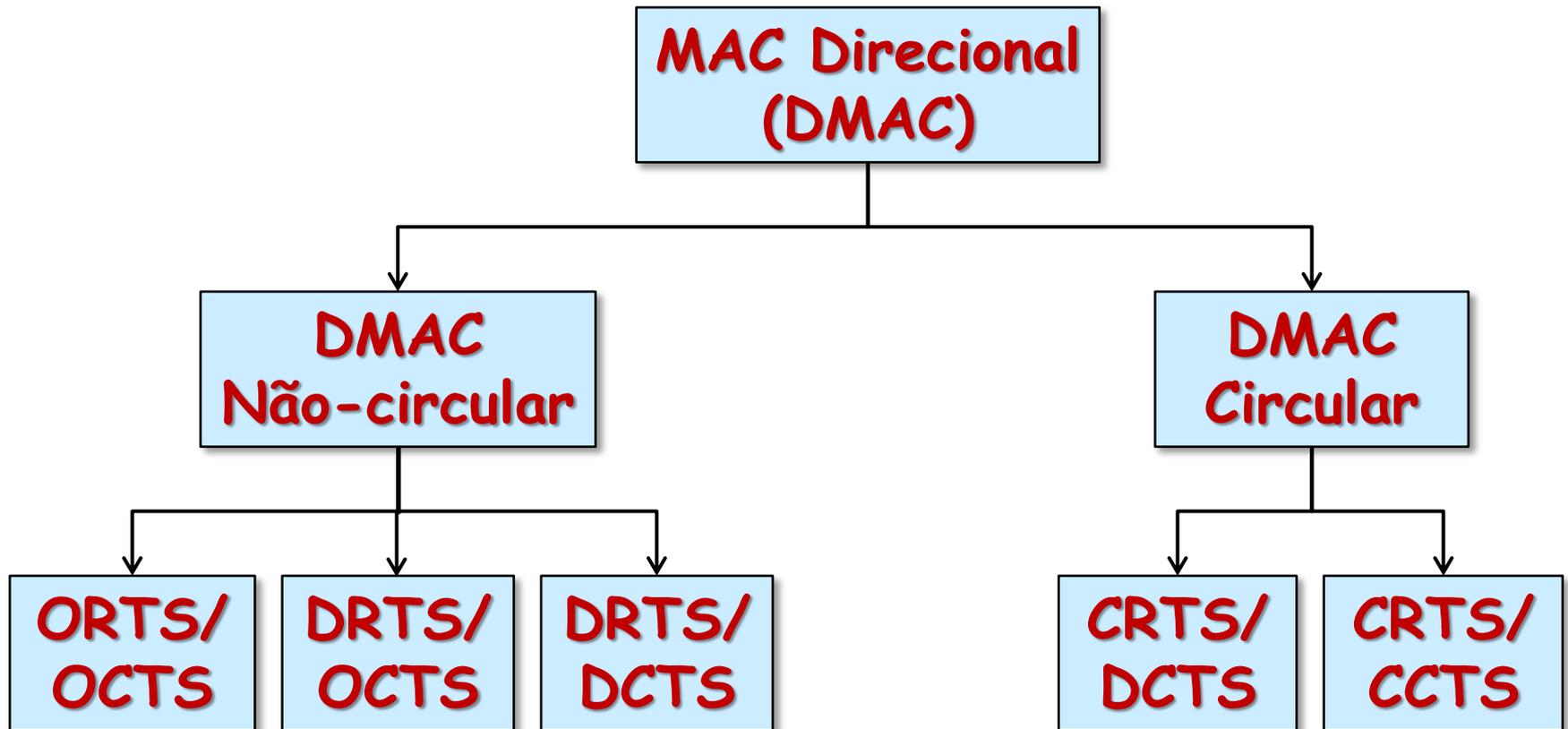


Varredura e alinhamento



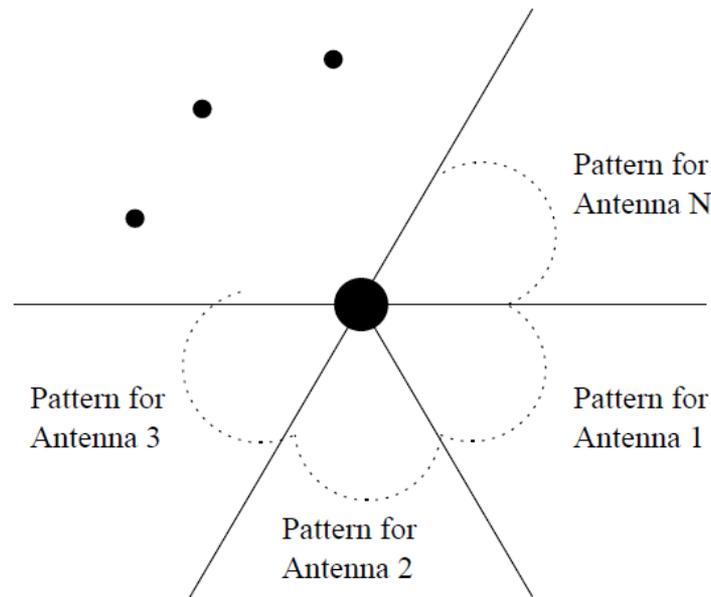
Antenas Direcionais

- Algumas abordagens



DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

- Usa RTS/CTS do IEEE 802.11 para identificar direção entre origem e destino
 - Transmissão dos dados é feita com antenas direcionais
 - Cada nó é equipado com M antenas direcionais

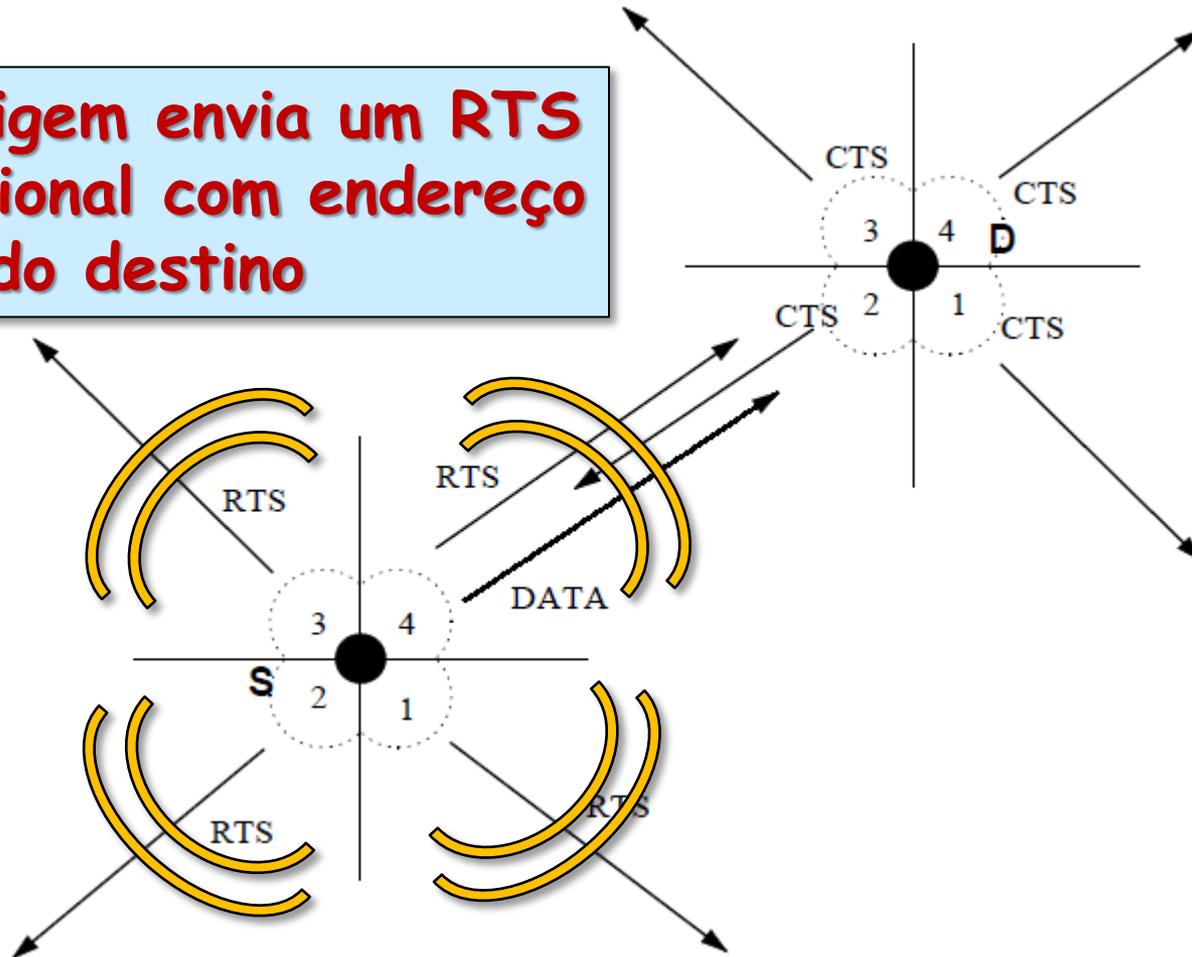


DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

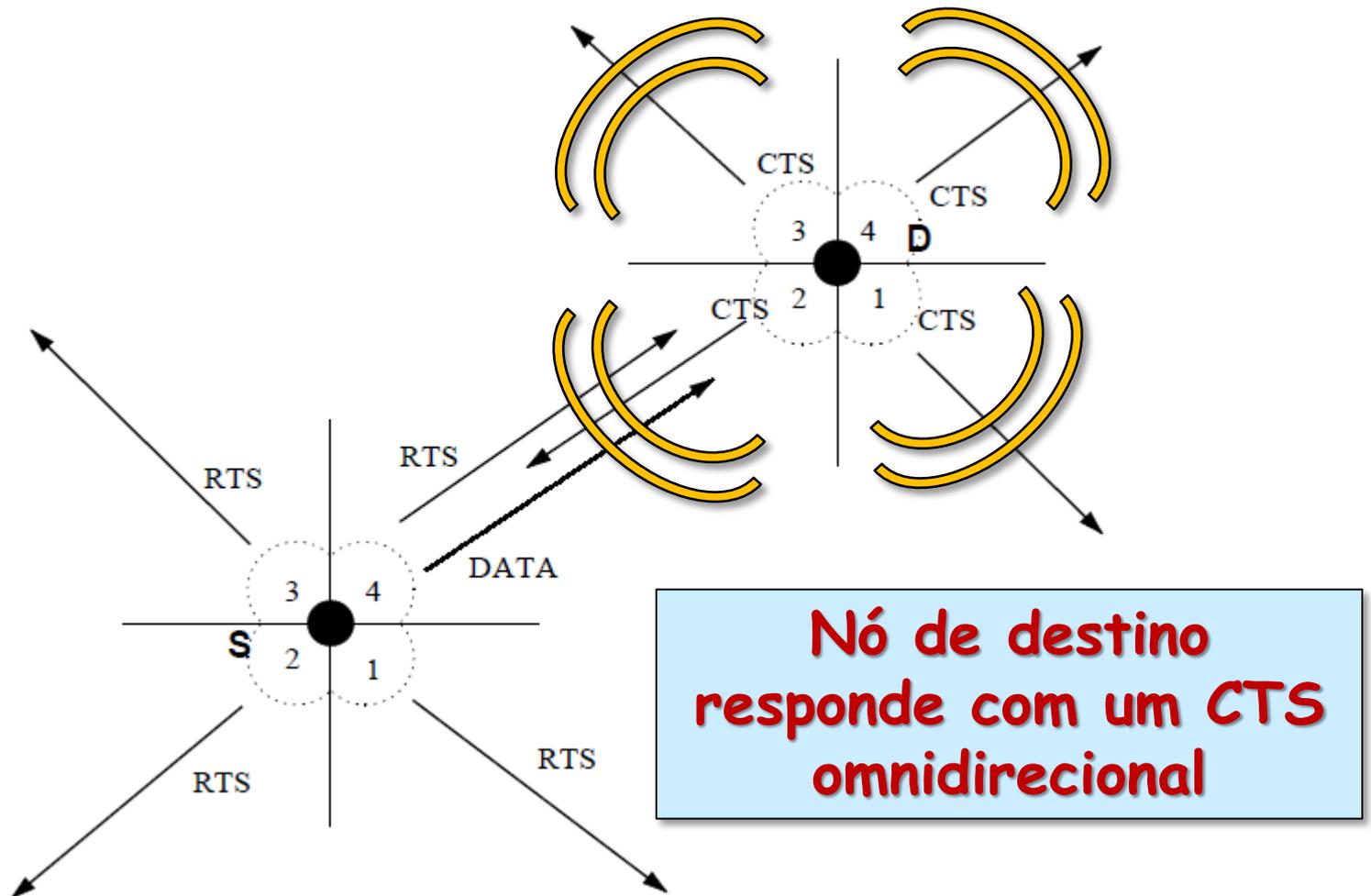
- Protocolo pode comutar antenas entre modo ativo e passivo
 - Transmissão/recepção usa apenas antenas ativas
- Transmissões com todas as antenas ativas
 - Sinal é transmitido em todas as direções
- Recepção em todas as antenas
 - Antena recebendo sinal com maior potência é usada
 - Antena direcionada à fonte do sinal recebido

DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

Nó de origem envia um RTS omnidirecional com endereço do destino

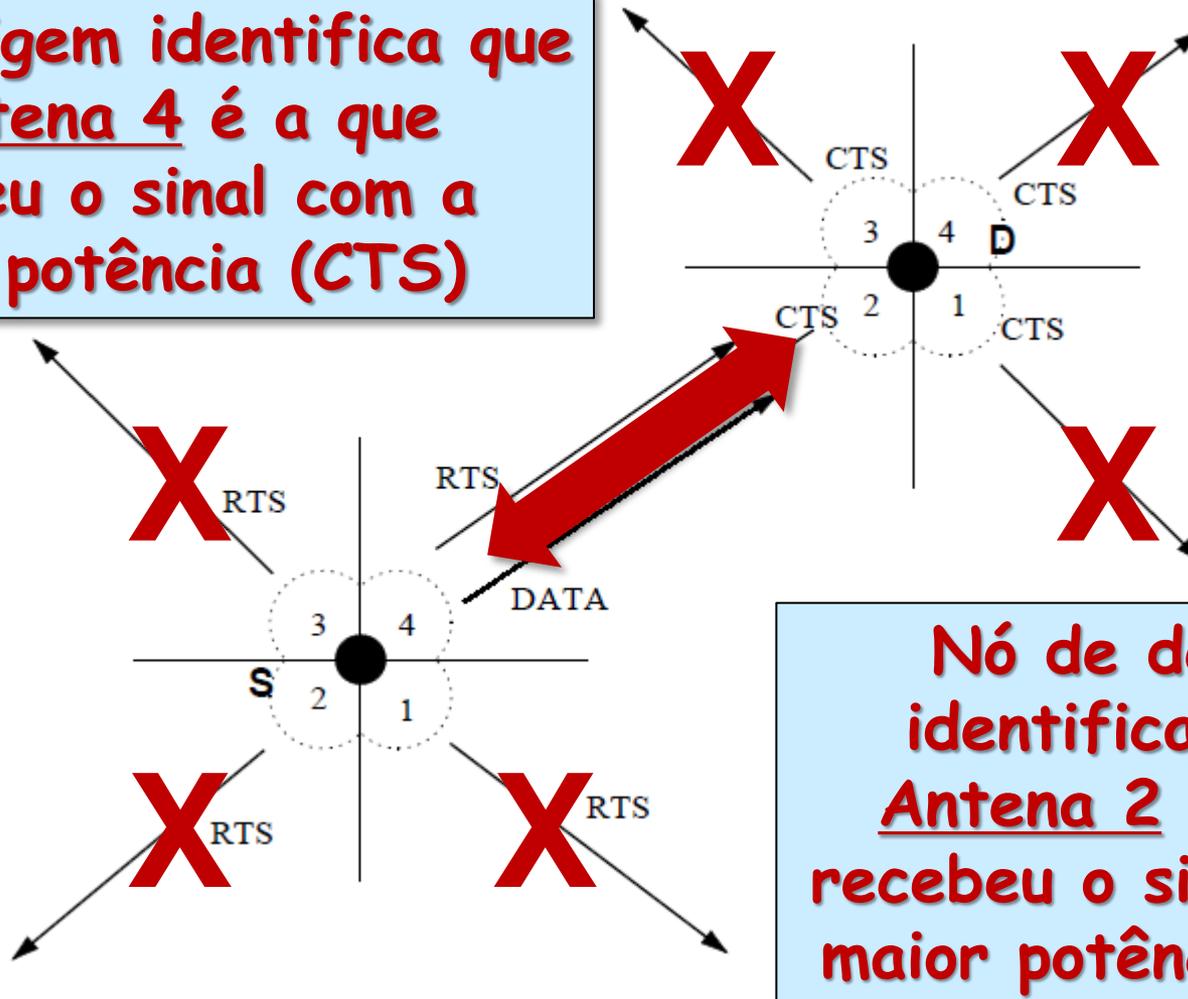


DMAC Não-circular: ORTS/OCTS



DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

Nó de origem identifica que a Antena 4 é a que recebeu o sinal com a maior potência (CTS)

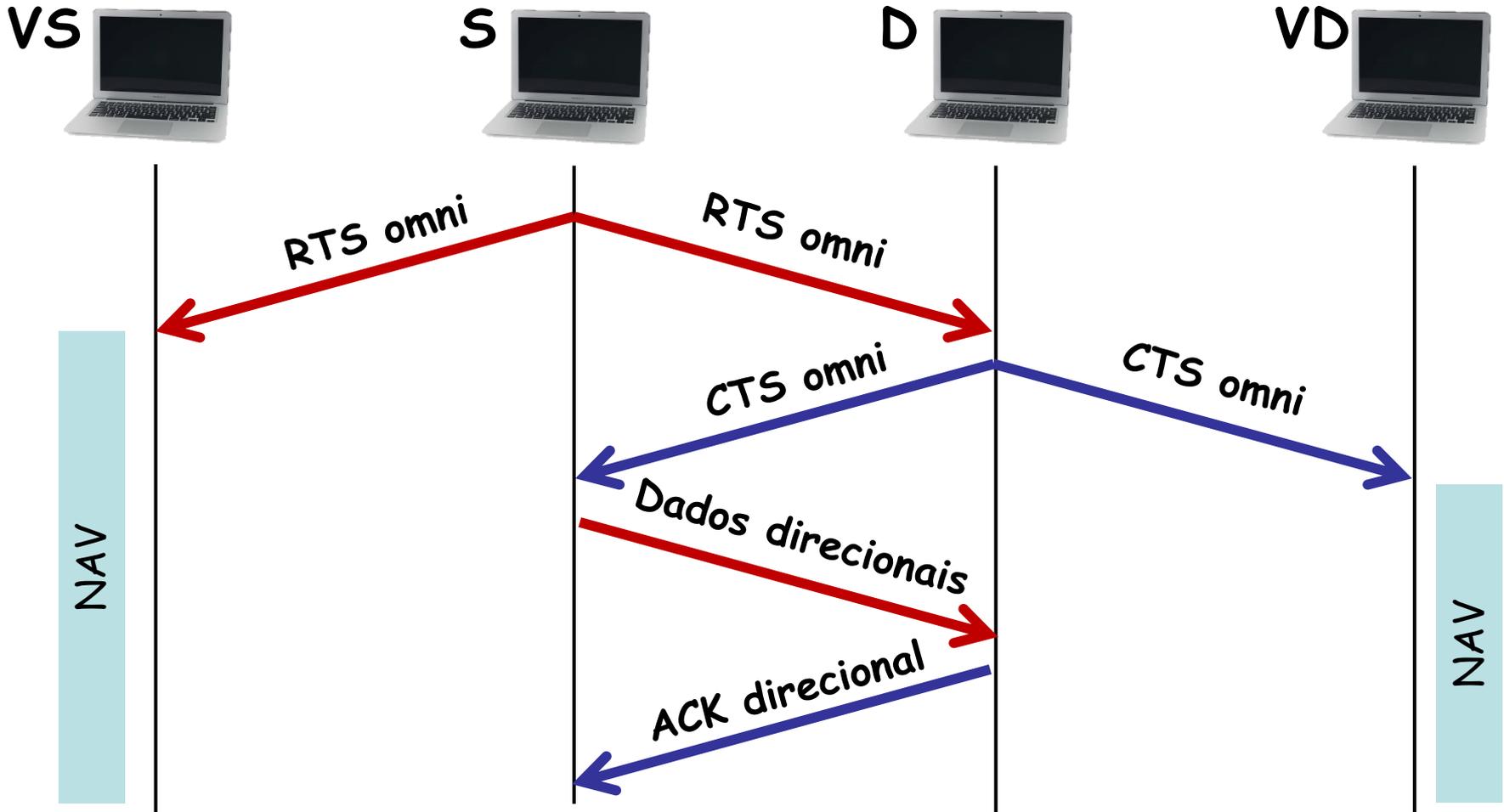


Nó de destino identifica que a Antena 2 é a que recebeu o sinal com a maior potência (RTS)

DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

- Operação:
 - Transmissor envia RTS por todas as antenas direcionais
 - Não sabe onde o destino se encontra
 - Receptor recebe RTS e também envia o CTS por todas as antenas direcionais
 - Porém, já identifica qual antena recebeu RTS com maior potência, a define como ativa, e coloca as outras como passivas
 - Transmissor recebe CTS por todas as antenas direcionais
 - Identifica qual antena recebeu CTS com maior potência, a define como ativa, e coloca todas as outras como passiva

DMAC Não-circular: ORTS/OCTS



DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

- Problemas:
 - Nós vizinhos que escutam RTS ou CTS esperam o meio ficar livre por NAV
 - Talvez pudessem transmitir para outras estações ao mesmo tempo...
 - Nós de origem e destino tornam todas as antenas passivas, exceto as que receberam o RTS/CTS com maior potência
 - Talvez pudessem ter mais de uma antena ativa para uso com mais de uma estação ao mesmo tempo...

DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

- Problemas:
 - Nós vizinhos que escutam RTS ou CTS esperam o meio ficar livre por NAV

Reuso é comprometido como consequência do envio omnidirecional do RTS/CTS

- Nós de origem e destino tornam todas as antenas passivas, exceto as que receberam o RTS/CTS com maior potência
 - Talvez pudessem ter mais de uma antena ativa para uso com mais de uma estação ao mesmo tempo...

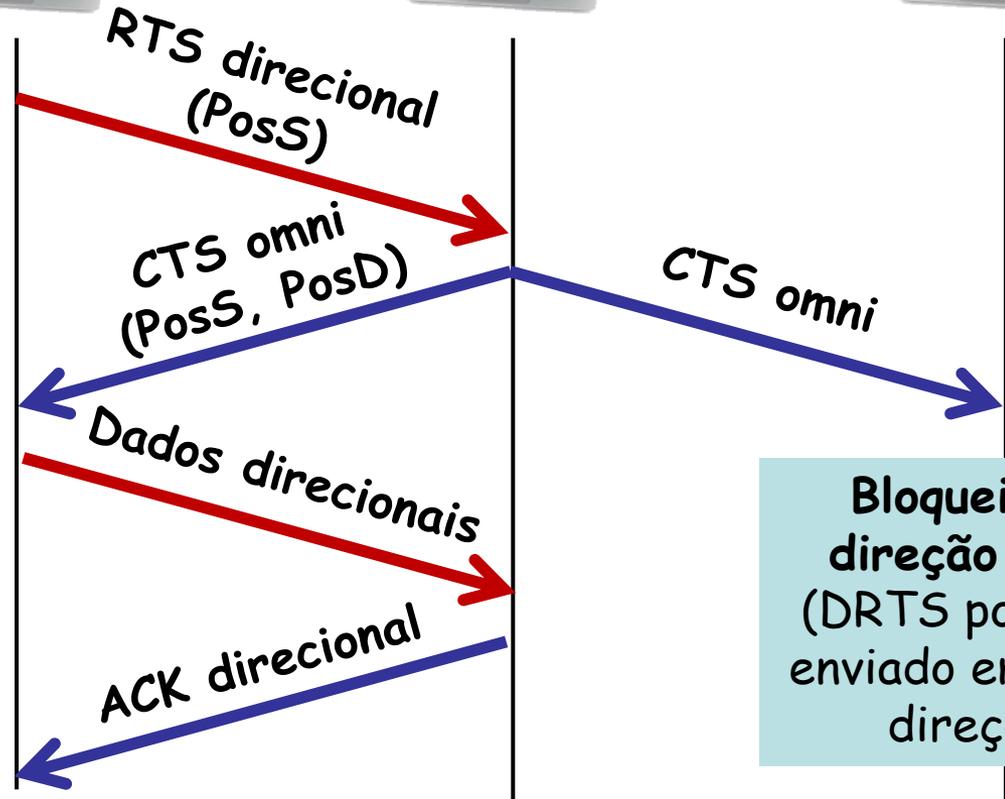
DMAC Não-circular: DRTS/OCTS

- D-MAC: Directional MAC
 - Assume que cada nó sabe a posição geográfica de seus vizinhos
 - Usa informações de um GPS
 - Bloqueio de uma antena direcional não significa bloqueio de todas as outras
 - Estações que tenham antenas bloqueadas podem usar uma das antenas não-bloqueadas para envio de DRTS
 - Nunca podem usar mais de uma antena ao mesmo tempo para envio/recepção de pacotes

DMAC Não-circular: DRTS/OCTS

- D-MAC: Directional MAC
 - Estação de origem envia DRTS (Directional RTS)
 - Origem conhece a posição do destino
 - Estação de destino envia CTS em todas as direções
 - Se preocupa mais com o destino que com a origem
 - Estação só pode responder CTS se todas as antenas estiverem ativas
 - Dados e ACK são enviados usando as antenas direcionais
 - Estações que escutarem DRTS/OCTS bloqueiam as antenas caso os pacotes não sejam destinados a eles

DMAC Não-circular: DRTS/OCTS



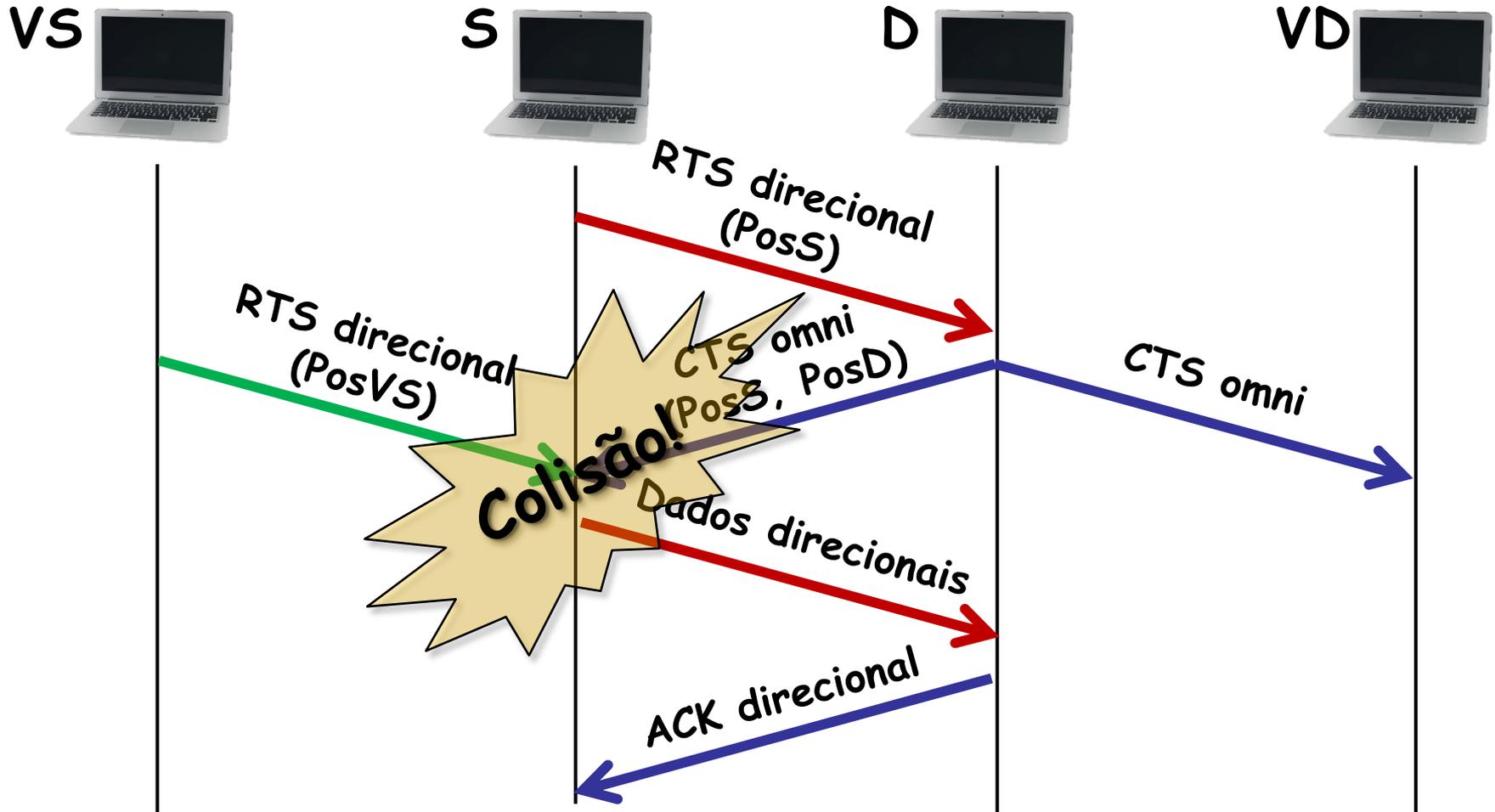
Pode enviar DRTS para qualquer outra estação pois não possui nenhuma antena bloqueada

Bloqueio na direção de D (DRTS pode ser enviado em outra direção)

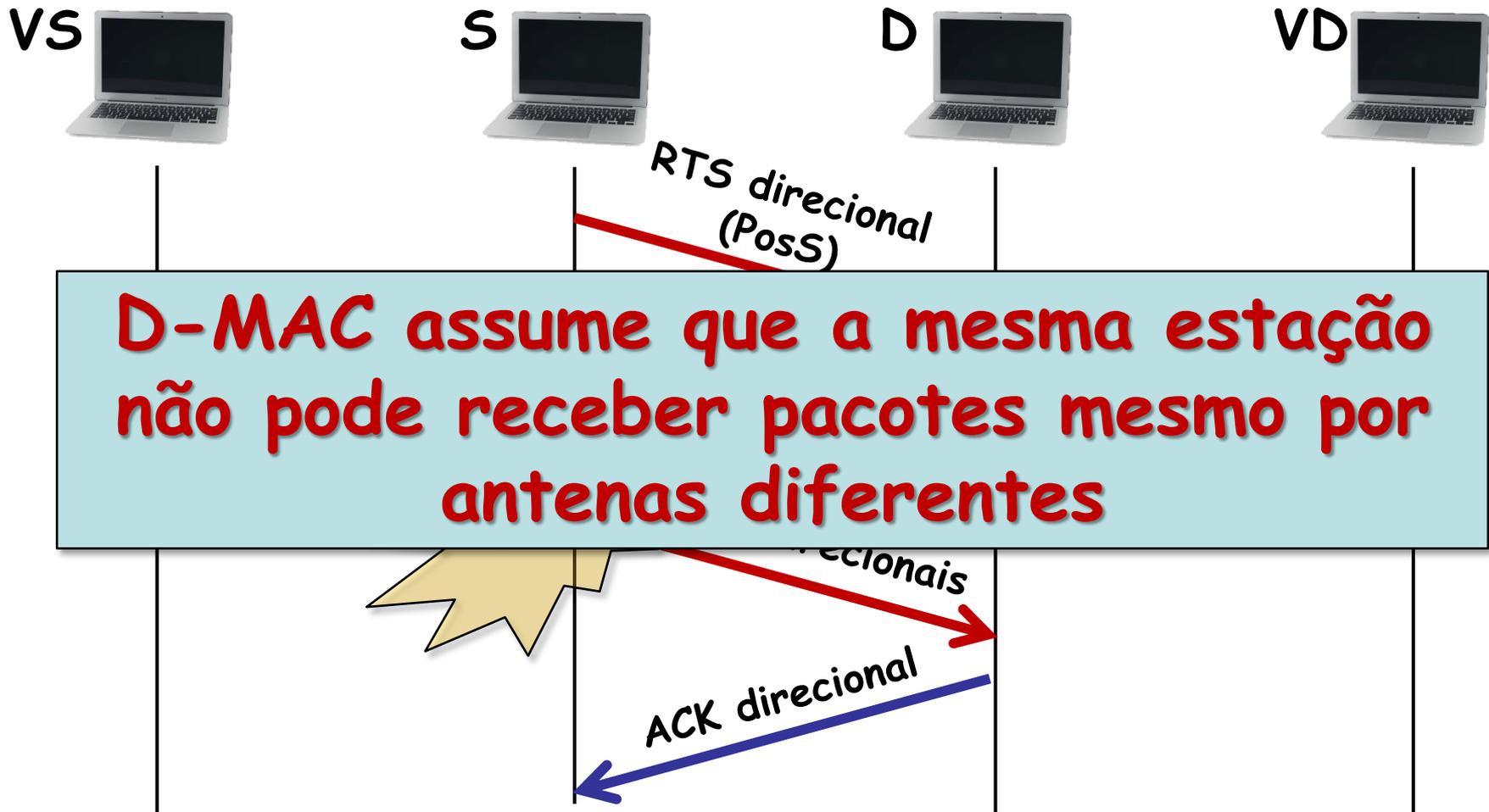
DMAC Não-circular: DRTS/OCTS



DMAC Não-circular: DRTS/OCTS



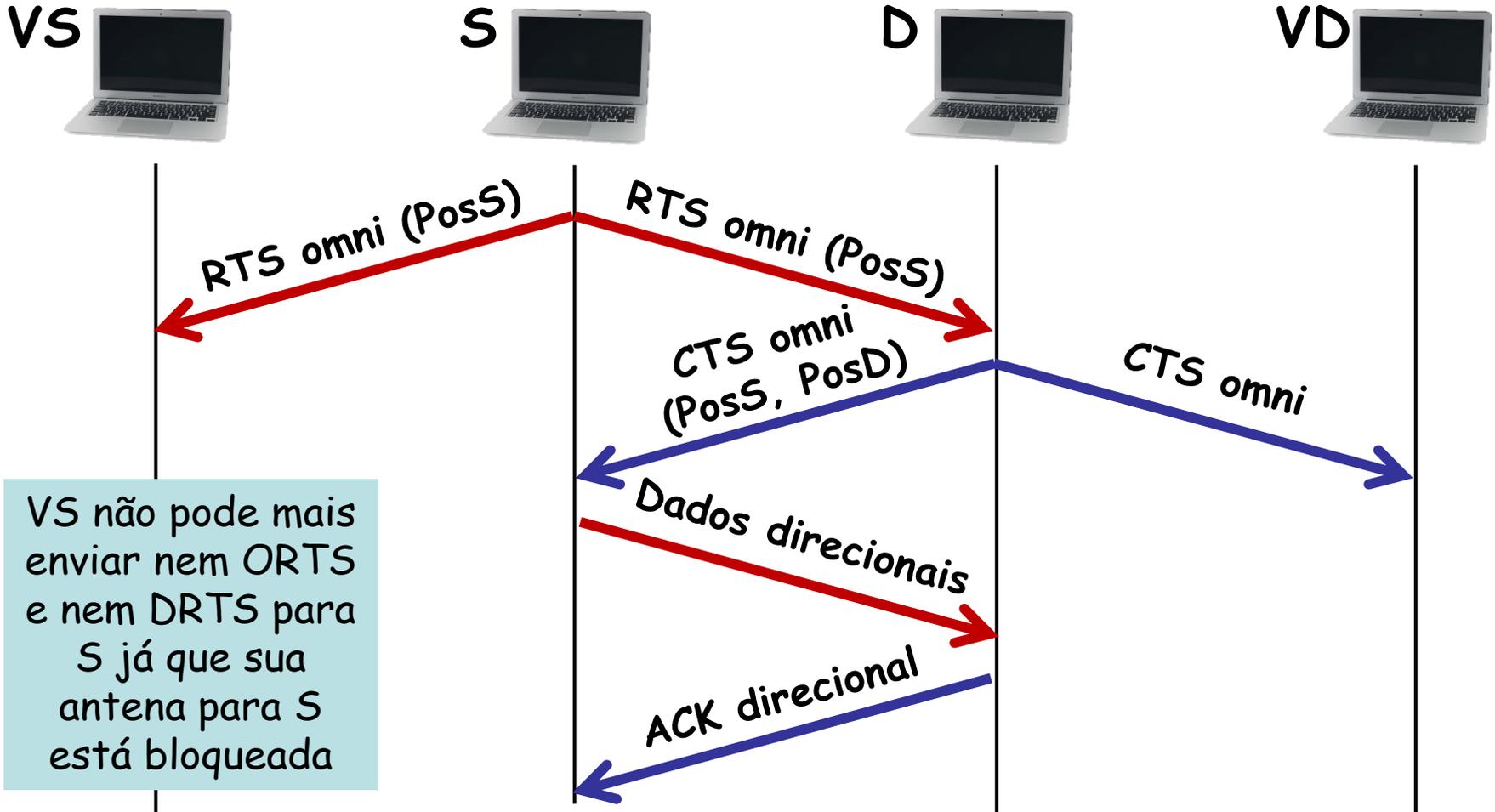
DMAC Não-circular: DRTS/OCTS



DMAC Não-circular: DRTS/OCTS

- Para evitar colisões...
 - D-MAC propõe ORTS (RTS omnidirecional) e DRTS
 - **ORTS**: Enviado sempre que nenhuma antena estiver bloqueada
 - **DRTS**: Enviado sempre que pelo menos uma antena estiver bloqueada
 - Exceção quando a antena a ser utilizada para envio do DRTS for uma que já esteja bloqueada...

DMAC Não-circular: DRTS/OCTS



DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- **DMAC/DA: Directional MAC with Deafness Avoidance**
 - Problemas identificados:
 - **Surdez (*deafness*):** Receptor não recebe RTS porque não está alinhado com o transmissor
 - **Colisão de RTS/CTS**
 - **Bloqueio de antenas:** Direções livres podem não ser usadas por opções dos protocolos
 - **Problema do terminal escondido direcional:** Terminal escondido por RTS ou CTS direcional pode ocorrer
 - **Mobilidade:** Estações podem sair do alcance ou podem não estar mais alinhadas com alguma direção prévia

DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

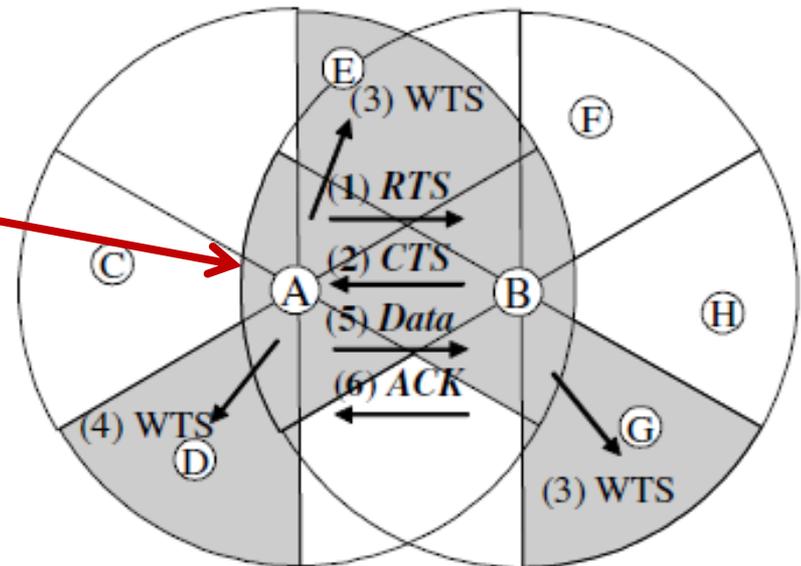
- Estações com M antenas direcionais não-sobrepostas
- Cada antena pode operar em dois modos:
 - Omnidirecional
 - Estações recebem sinais em todas as direções
 - Estações ociosas esperam sinais em modo omni
 - Direcional
 - Estações mudam para modo direcional caso um sinal seja recebido
 - Estações identificam a direção baseada na potência do sinal

DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- Cada nó mantém uma tabela de vizinhos conhecidos
 - Informações sobre feixe/vizinho, tempo em que o vizinho está ocupado (deafness) e tempo da última recepção de pacote vindo do vizinho (*RxTime)
 - *RxTime: Estações que acabaram de enviar pacote devem enviar outro em breve

Tabela da estação A

| ID | Beam Number | Deafness Duration | Link Activity |
|----|-------------|-------------------|---------------|
| B | 1 | - | - |
| D | 3 | - | D_{RxTime} |
| C | 4 | T_C | - |
| E | 6 | - | E_{RxTime} |

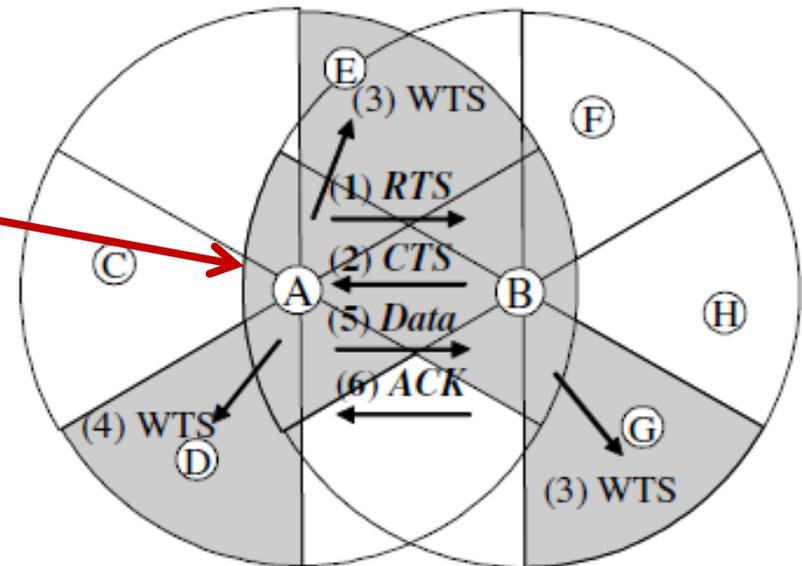


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- Operação:
 - Estação transmissora verifica potenciais transmissores
 - Informação contida em sua tabela de vizinhança
 - Ex. A identifica D e E como potenciais transmissores

Tabela da estação A

| ID | Beam Number | Deafness Duration | Link Activity |
|----|-------------|-------------------|---------------|
| B | 1 | - | - |
| D | 3 | - | D_{RxTime} |
| C | 4 | T_C | - |
| E | 6 | - | E_{RxTime} |

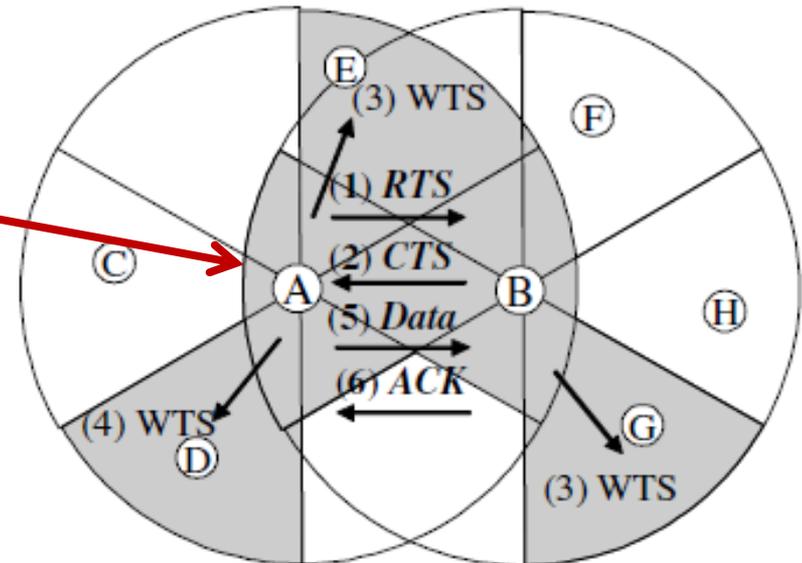


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- Operação:
 - Estação transmissora muda para modo direcional para envio do RTS
 - Se o potencial receptor for alcançado a partir de um feixe que não tenha um potencial transmissor (D, E) ou a partir de um feixe sem NAV direcional (DNAV) ajustado (C)

Tabela da estação A

| ID | Beam Number | Deafness Duration | Link Activity |
|----|-------------|-------------------|---------------|
| B | 1 | - | - |
| D | 3 | - | D_{RxTime} |
| C | 4 | T_C | - |
| E | 6 | - | E_{RxTime} |

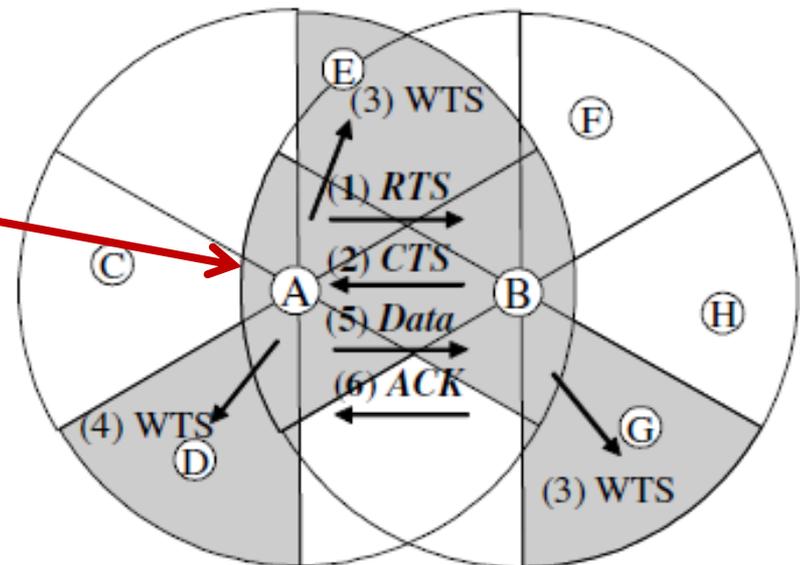


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- Operação:
 - Estação receptora muda para modo direcional para envio do CTS

Tabela da estação A

| ID | Beam Number | Deafness Duration | Link Activity |
|----|-------------|-------------------|---------------|
| B | 1 | - | - |
| D | 3 | - | D_{RxTime} |
| C | 4 | T_C | - |
| E | 6 | - | E_{RxTime} |

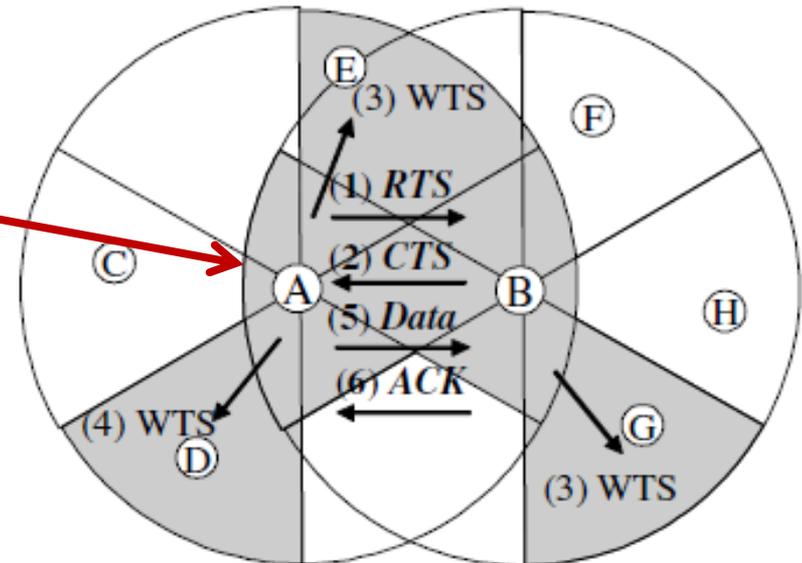


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- Operação:
 - Depois do RTS/CTS...
 - Transmissor e receptor enviam WTS (*Wait To Send*) para todas as estações transmissoras em potencial
 - Evitam problemas de colisão por surdez

Tabela da estação A

| ID | Beam Number | Deafness Duration | Link Activity |
|----|-------------|-------------------|---------------|
| B | 1 | - | - |
| D | 3 | - | D_{RxTime} |
| C | 4 | T_C | - |
| E | 6 | - | E_{RxTime} |

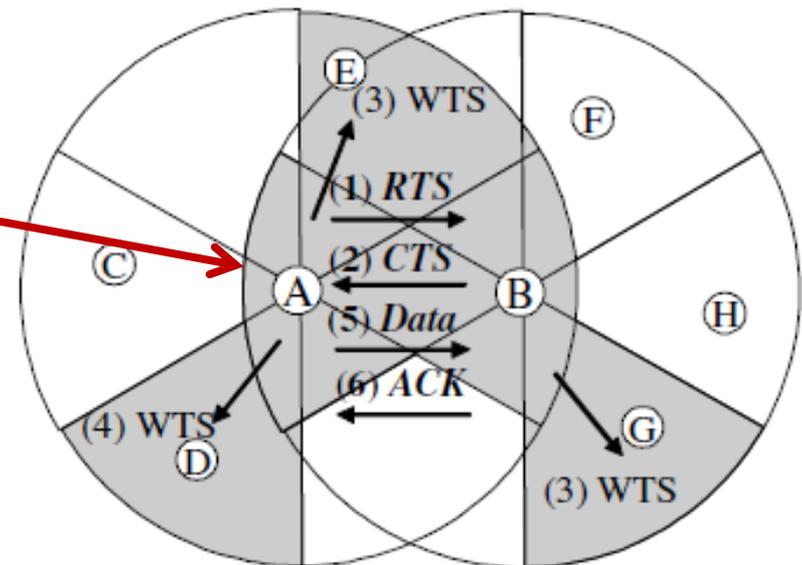


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- Operação:
 - Estação que recebe WTS...
 - Coloca as estações de origem como surdas
 - Ex. C está surda por T_C instantes de tempo

Tabela da estação A

| ID | Beam Number | Deafness Duration | Link Activity |
|----|-------------|-------------------|---------------|
| B | 1 | - | - |
| D | 3 | - | D_{RxTime} |
| C | 4 | T_C | - |
| E | 6 | - | E_{RxTime} |

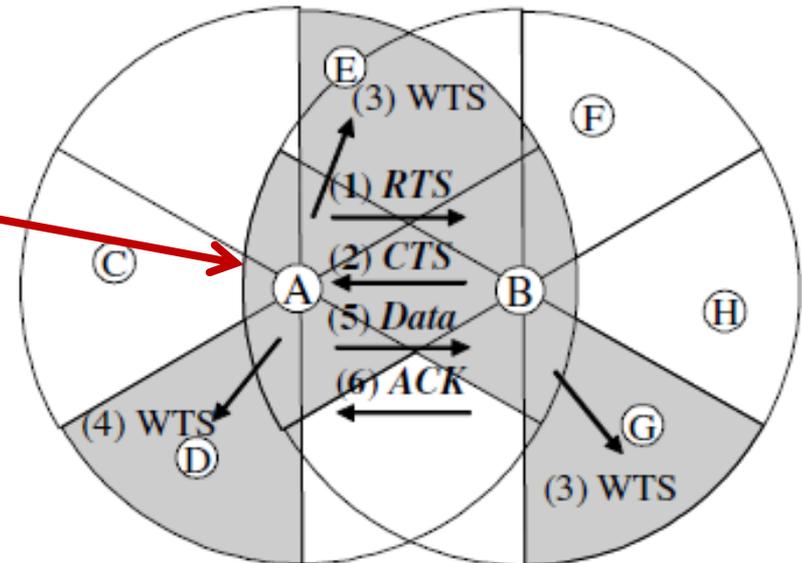


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

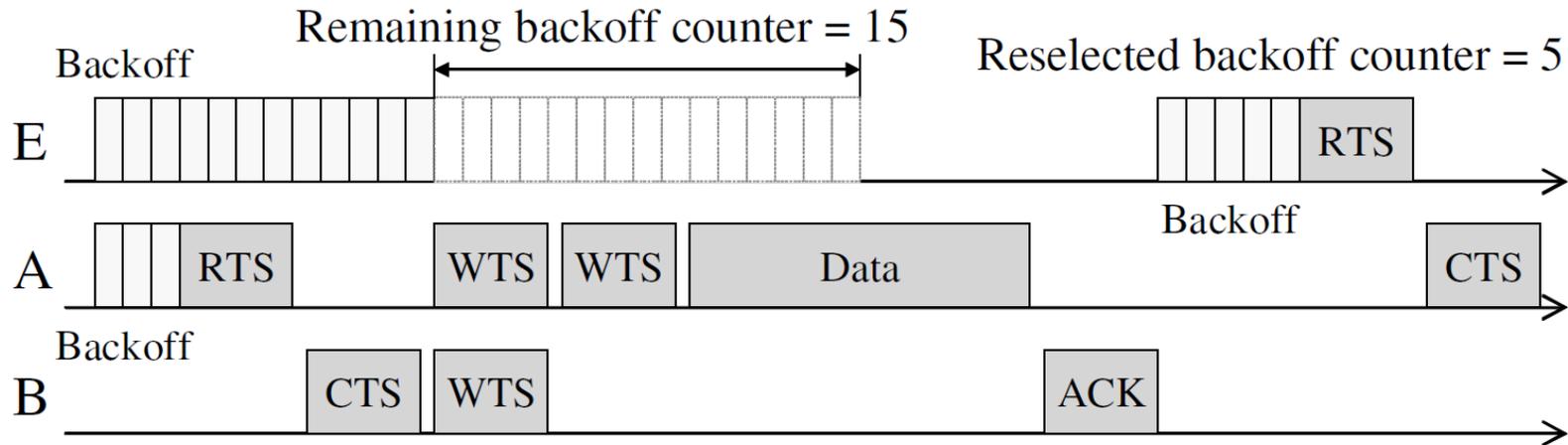
- Operação:
 - Depois dos WTSes...
 - Estações enviam dados e ACK em modo direcional
 - Depois que os dados forem enviados e confirmados
 - Estações voltam ao modo omnidirecional

Tabela da estação A

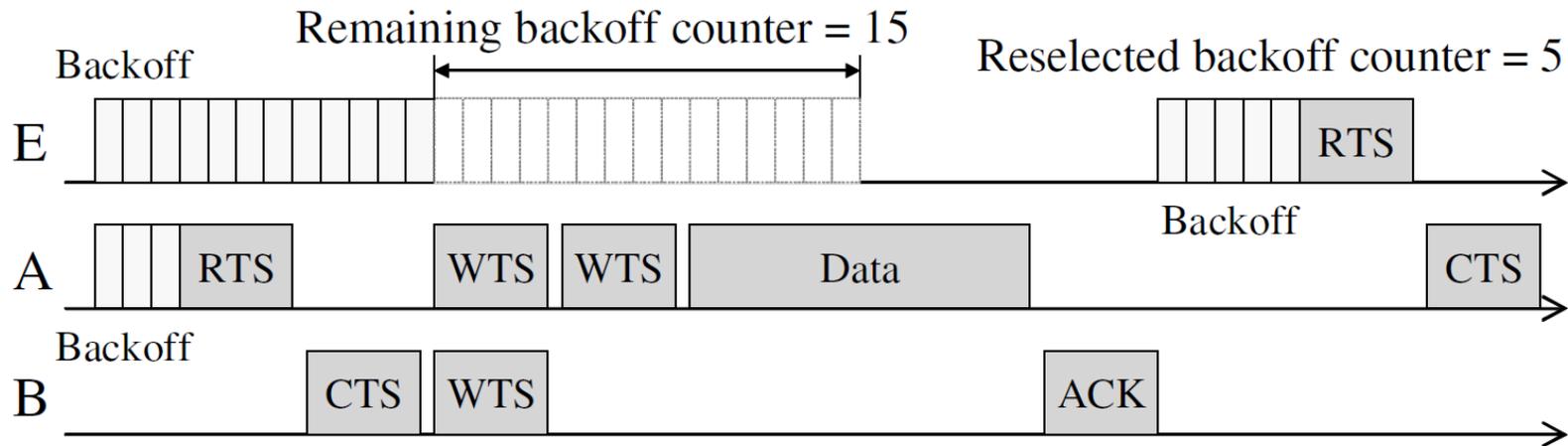
| ID | Beam Number | Deafness Duration | Link Activity |
|----|-------------|-------------------|---------------|
| B | 1 | - | - |
| D | 3 | - | D_{RxTime} |
| C | 4 | T_C | - |
| E | 6 | - | E_{RxTime} |



DMAC Não-circular: DRTS/DCTS



DMAC Não-circular: DRTS/DCTS



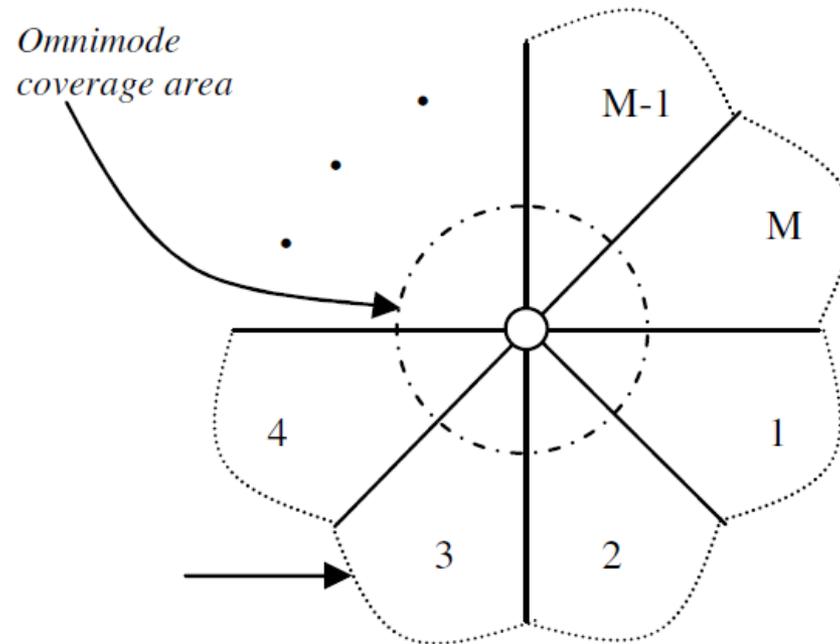
**E atrasa a sua transmissão para A após receber o WTS pelo tempo indicado...
Em sua nova tentativa, E resorteia o contador de backoff**

DMAC Circular: CRTS/DCTS

- Proposta de protocolo deve partir de 4 premissas:
 - Protocolo deve usar apenas as antenas direcionais
 - Protocolo deve avisar vizinhos sobre possíveis transmissões
 - Assim evitar problema do terminal escondido
 - Protocolo deve lidar com problemas de surdez
 - Protocolo deve manter informações de localização dos vizinhos

DMAC Circular: CRTS/DCTS

- Estações com M antenas direcionais não-sobrepostas



DMAC Circular: CRTS/DCTS

- Operação:
 - Estações enviam RTS circular
 - De forma consecutiva e direcional, o RTS é enviado por todos os eixos ao redor do transmissor
 - Após terminar o RTS circular, a estação volta a escutar em modo omni
 - RTS é enviado de forma circular pois não se sabe a posição do destino
 - Estações que recebem o RTS circular
 - Envia o CTS de forma direcional ao transmissor após o término do RTS circular
 - Pacotes de dados e ACK são enviados de forma direcional

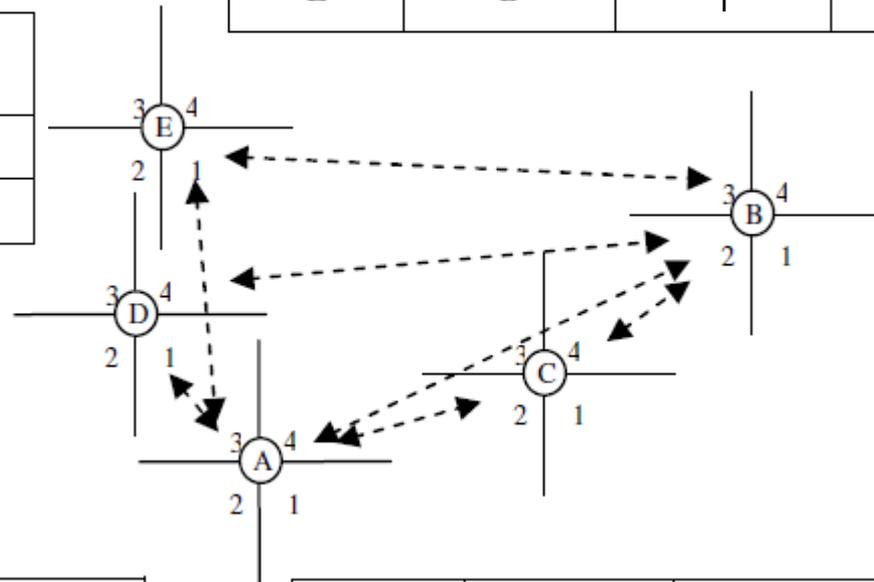
DMAC Circular: CRTS/DCTS

- Operação:
 - Outras estações que escutem RTS/CTS
 - Decidem se adiam a transmissão na direção do transmissor ou do receptor caso prejudiquem a comunicação
 - Uso do DNAV (*Directional NAV*) ajustado com valores recebidos no CRTS/DCTS
 - Uso da tabela de vizinhança
 - Caso queiram iniciar uma transmissão, não podem enviar RTS circular na direção de uma comunicação corrente
 - Direção fica bloqueada

DMAC Circular: CRTS/DCTS

| Me | Neighbor | My Beam | Neighbor's Beam |
|----|----------|---------|-----------------|
| E | A | 1 | 3 |
| E | B | 1 | 3 |

| Me | Neighbor | My Beam | Neighbor's Beam |
|----|----------|---------|-----------------|
| D | A | 1 | 3 |
| D | B | 4 | 2 |



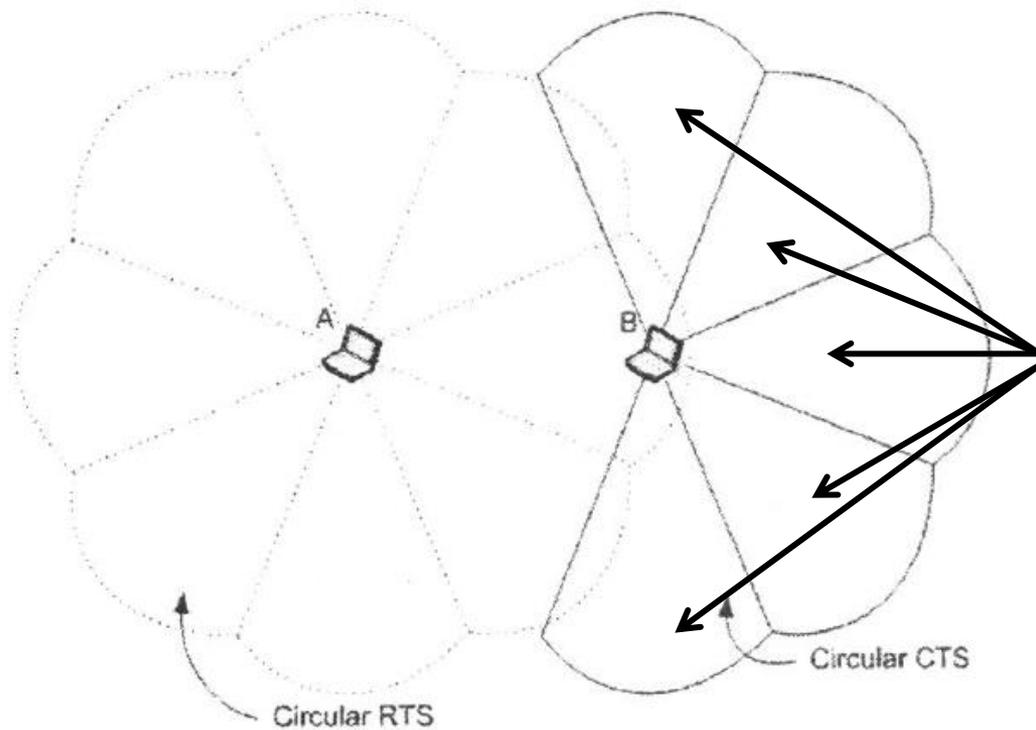
| Me | Neighbor | My Beam | Neighbor's Beam |
|----|----------|---------|-----------------|
| A | B | 4 | 2 |

| Me | Neighbor | My Beam | Neighbor's Beam |
|----|----------|---------|-----------------|
| C | A | 2 | 4 |
| C | B | 4 | 2 |

DMAC Circular: CRTS/CCTS

- **CRCM: Circular RTS and CTS MAC Protocol**
- **Operação:**
 - Estação de origem envia RTS direcionalmente e circularmente
 - **RTS é enviado por todos os feixes em volta do transmissor**
 - Estação de destino envia o CTS direcionalmente
 - **Porém, envia também CTS direcional para os nós que estão apenas em sua vizinhança**
 - **Esses são os nós que poderiam causar colisão no destino e que não escutam o RTS**

DMAC Circular: CRTS/CCTS



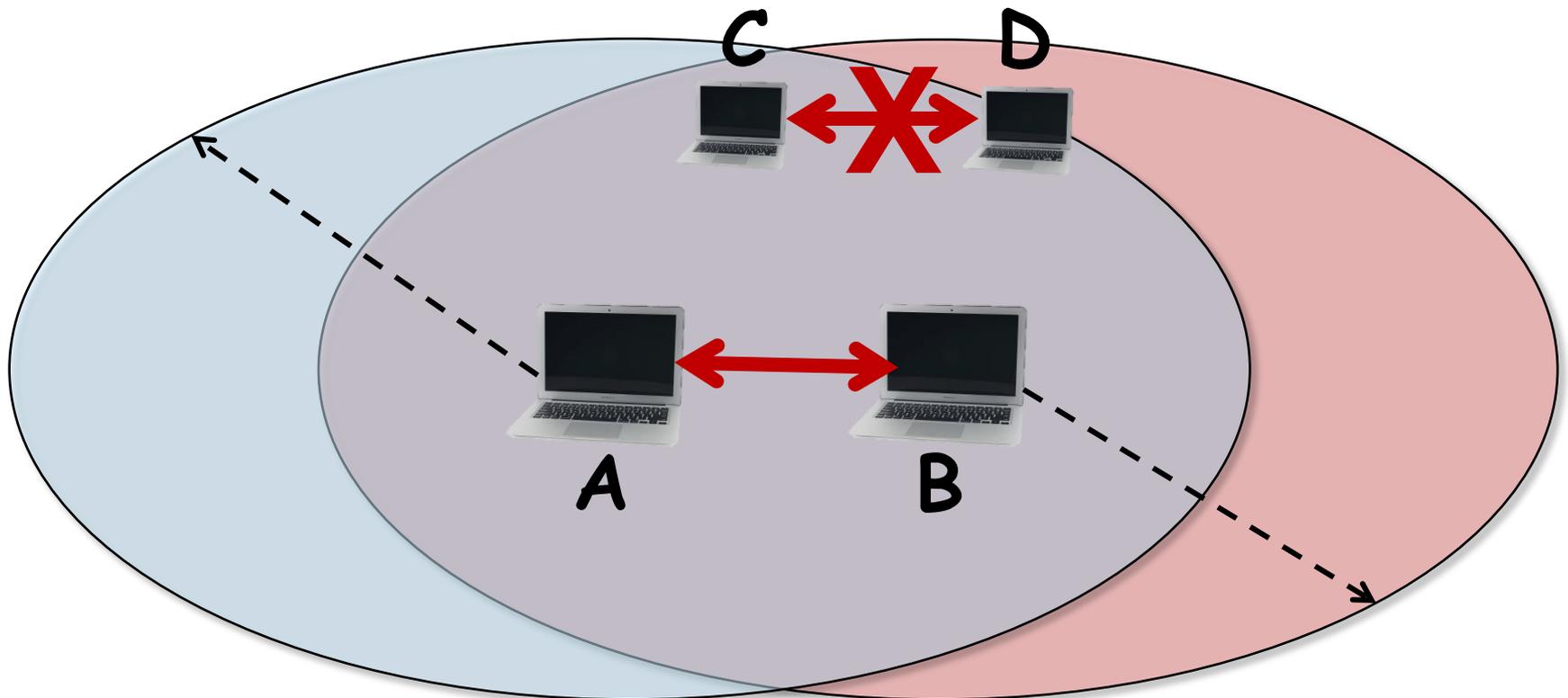
Estações que também recebem CTS direcional além da estação de origem do RTS

DMAC Circular: CRTS/CCTS

- Operação:
 - Outras estações que escutem o RTS/CTS
 - Decidem se adiam a transmissão na direção do transmissor ou do receptor caso prejudiquem a comunicação
 - Todas mantêm tabela de vizinhança com informações sobre feixes e vizinhos
 - Da mesma forma que o "DMAC circular: CRTS/DCTS"

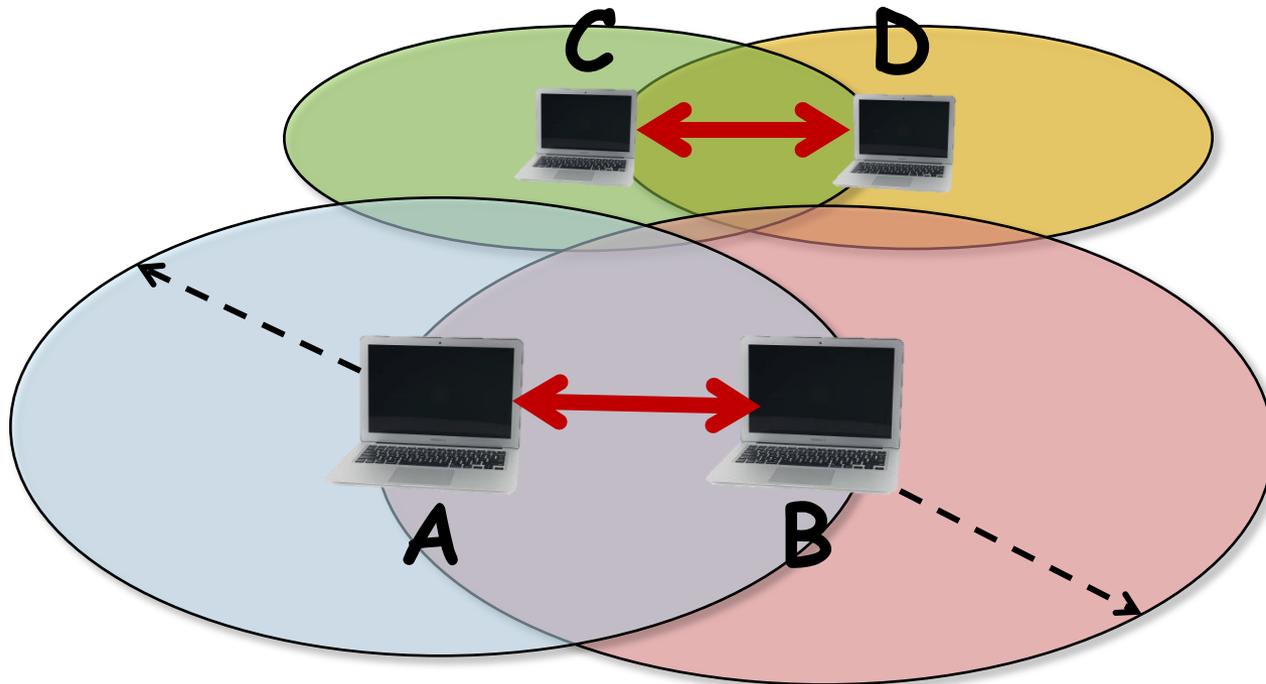
Controle de Potência

- Permite maior reuso espacial e maior alcance
 - AB reservam o canal transmitindo com potência máxima
 - CD não podem acessar o meio ao mesmo tempo que AB



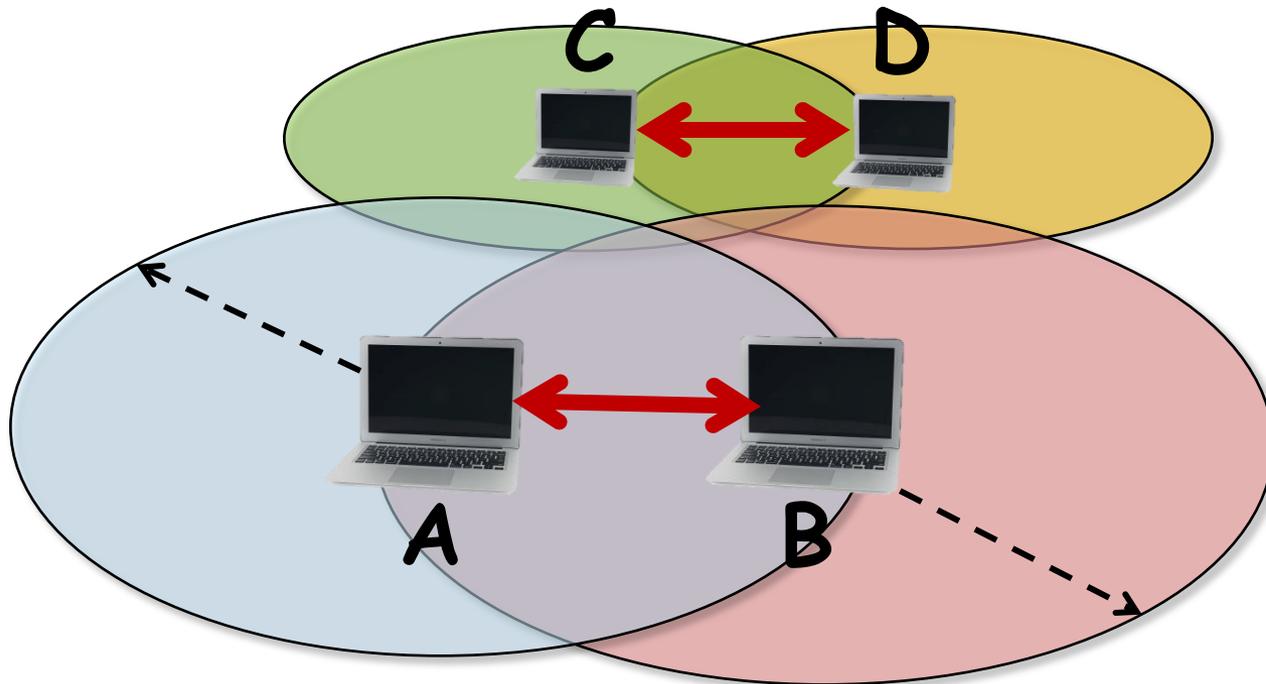
Controle de Potência

- Permite maior reuso espacial e maior alcance
 - AB reservam o canal reduzindo a potência do sinal
 - CD **podem** acessar o meio ao mesmo tempo que AB



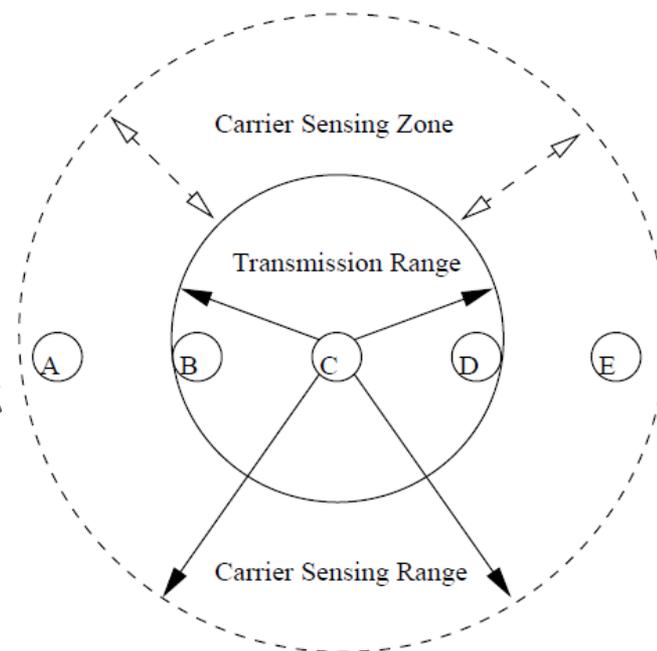
Controle de Potência

- Permite também economia de energia
 - Redução da potência de transmissão economiza energia

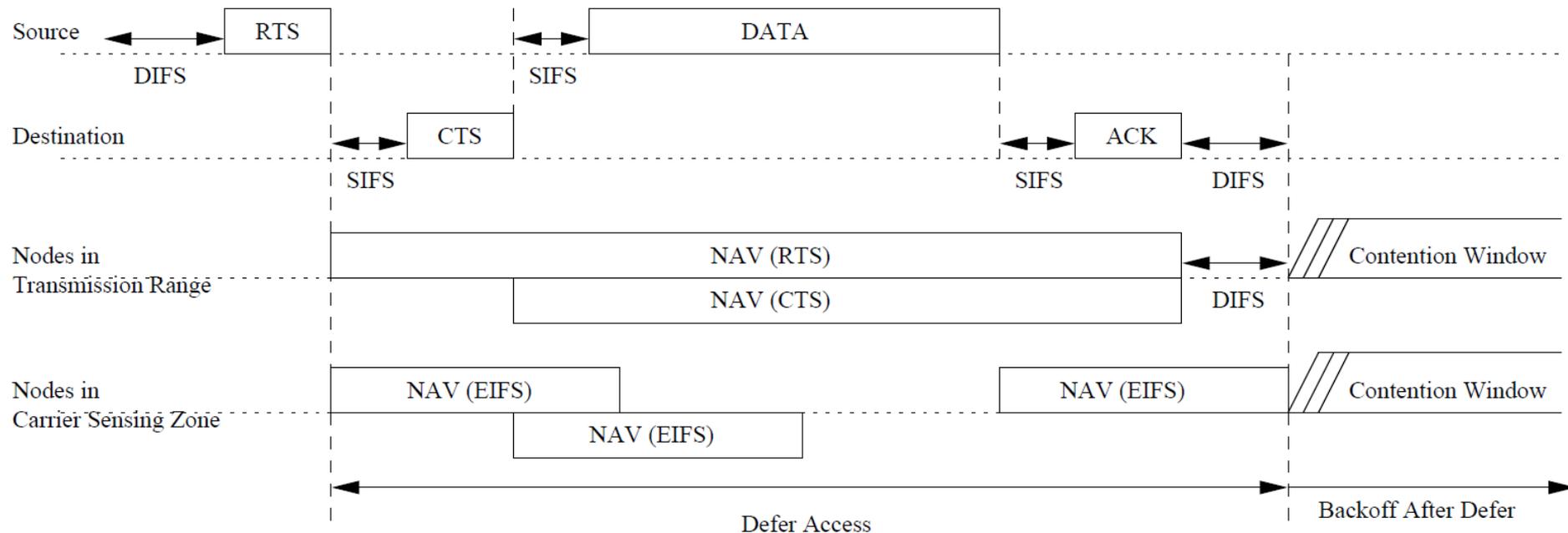


Controle de Potência: Definições

- Raio de transmissão
 - Nós no raio de transmissão conseguem receber corretamente os pacotes e decodificá-los
- Raio de escuta de portadora
 - Nós no raio de escuta de portadora podem escutar a transmissão, mas não podem decodificar os pacotes
- Zona de escuta de portadora
 - Área onde apenas se consegue escutar a portadora

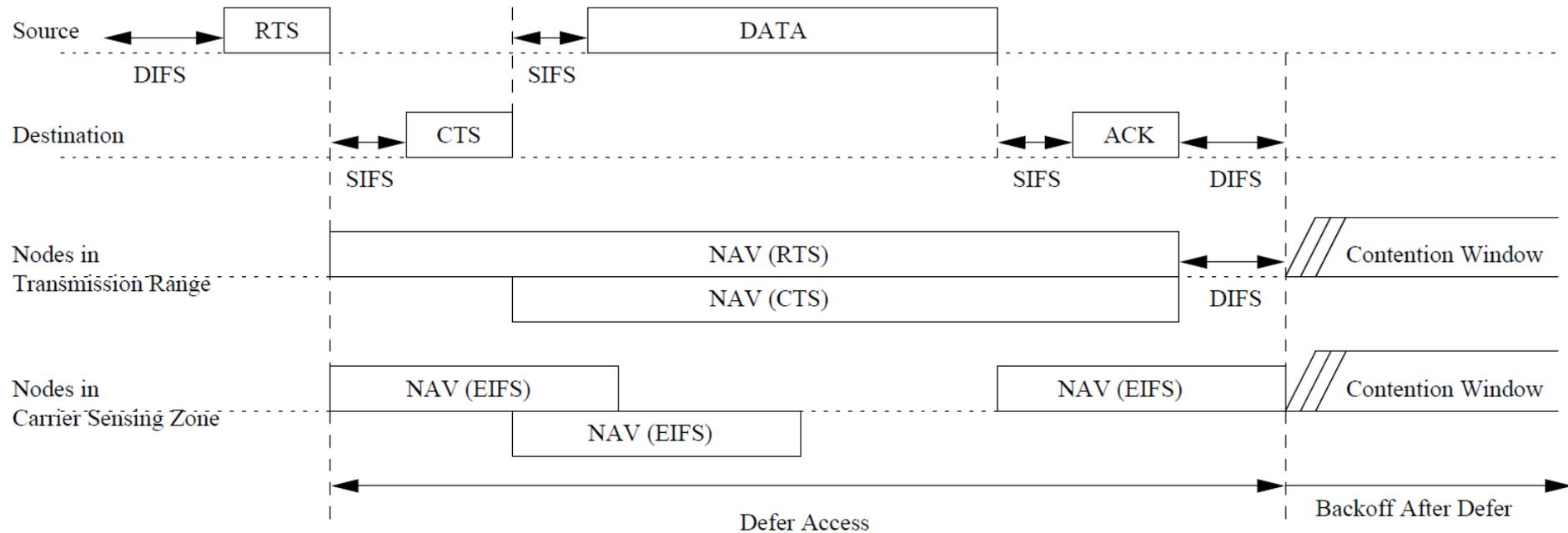


Acesso ao Meio



EIFS é um tempo entre quadros usado para evitar colisões envolvendo estações que estejam na zona de escuta de portadora

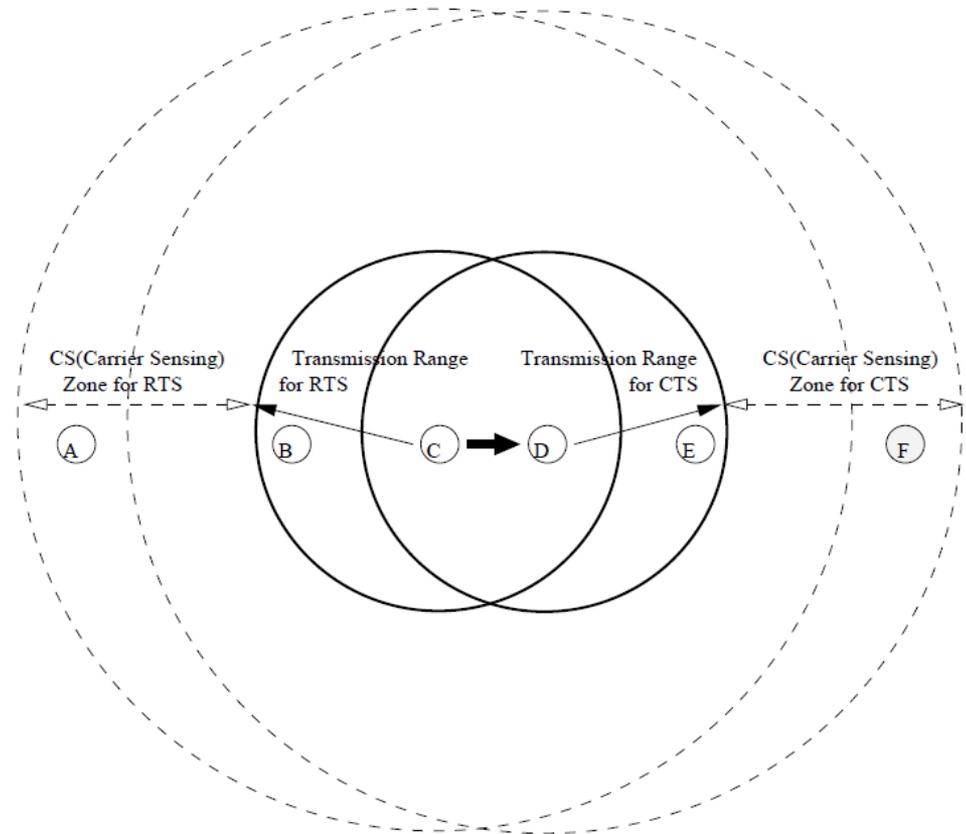
Acesso ao Meio



$$EIFS = T_{ACK} + DIFS + SIFS$$

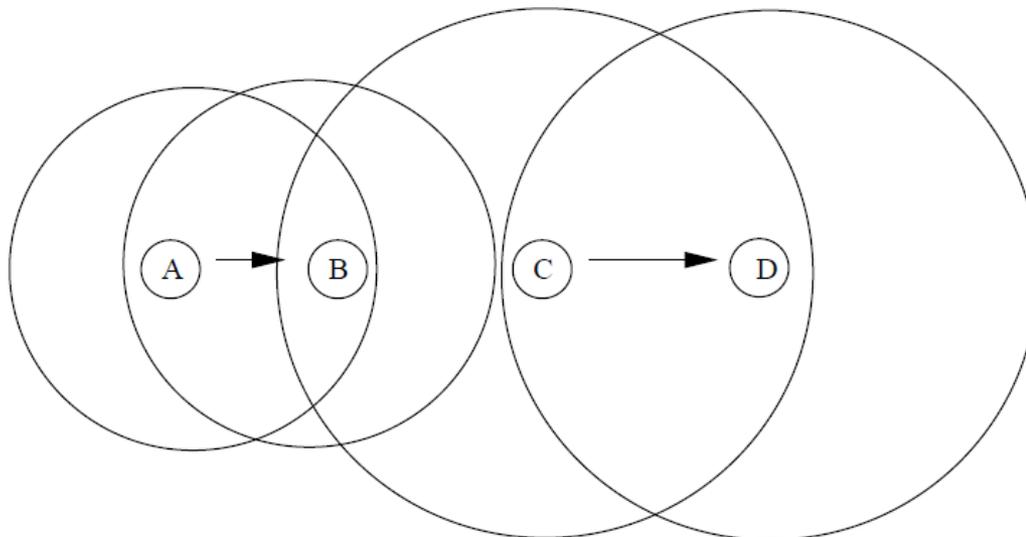
Acesso ao Meio

EIFS não impede colisões...
Transmissão $C \rightarrow D$
não é escutada por F. Transmissão **$F \rightarrow E$**
pode acontecer,
gerando
interferência em D



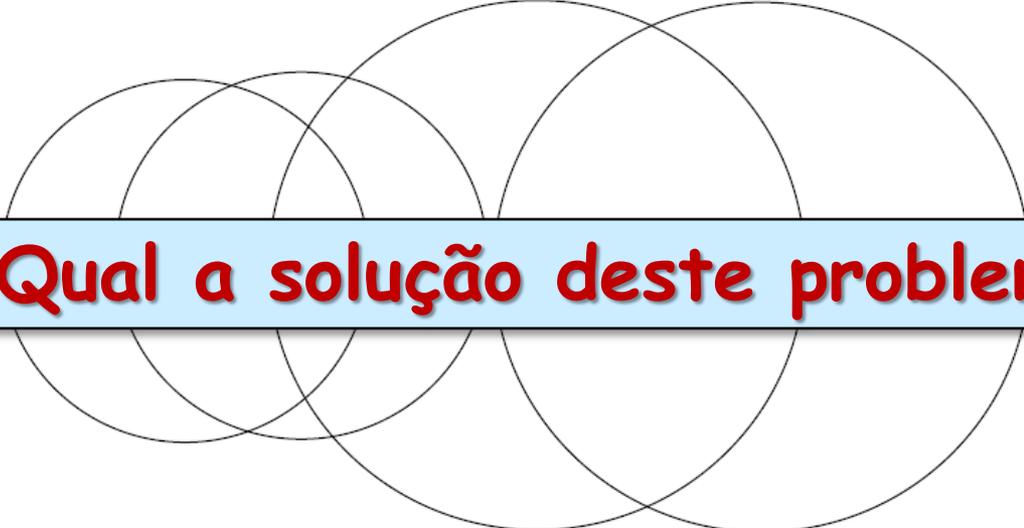
Problemas para Controlar a Potência

- Controle de potência individual pode gerar:
 - Assimetrias
 - Estação A pode alcançar B, mas não o contrário
 - Colisões
 - Ex. C ignora transmissão entre AB com potência mais baixa e acessa o meio causando colisão



Problemas para Controlar a Potência

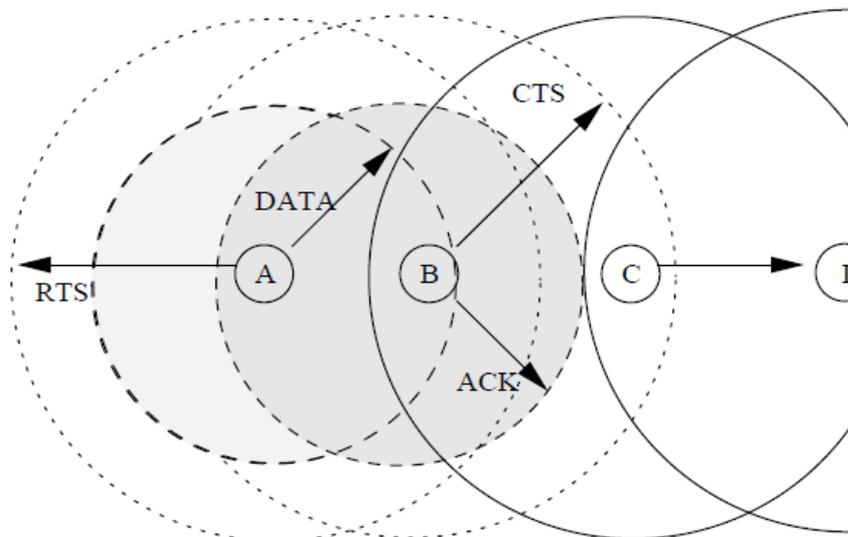
- Controle de potência individual pode gerar:
 - Assimetrias
 - Estação A pode alcançar B, mas não o contrário
 - Colisões
 - Ex. C ignora transmissão entre AB com potência mais baixa e acessa o meio causando colisão



Qual a solução deste problema?

Problemas para Controlar a Potência

- Controle de potência individual pode gerar:
 - Assimetrias
 - Estação A pode alcançar B, mas não o contrário
 - Colisões
 - Ex. C ignora transmissão entre AB com potência mais baixa e acessa o meio causando colisão



**Reservar o meio
com RTS/CTS
enviados na
potência máxima!**

Alternativas para Controlar a Potência

- Potência de transmissão pode ser ajustada de duas formas... **primeira** forma:
 - Estação de origem envia RTS em potência máxima p_{max}
 - Estação de destino recebe o RTS com potência p_r
 - Baseado no conhecimento de p_{max} , p_r e no ruído, a estação de destino calcula a potência mínima que a estação de origem pode transmitir, chamado de $p_{desejado}$
 - Estação de destino envia o CTS indicando $p_{desejado}$ à estação de origem

Alternativas para Controlar a Potência

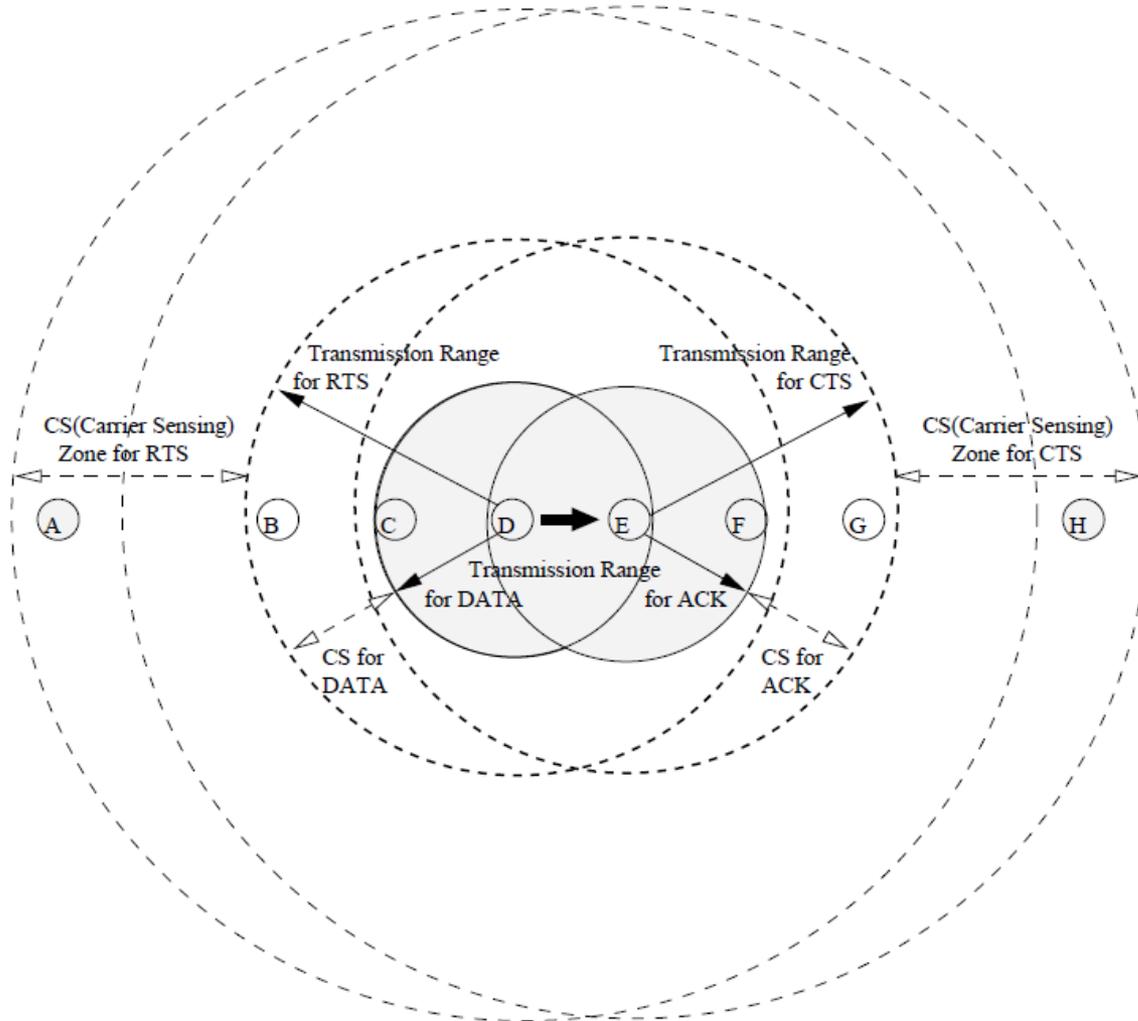
- Potência de transmissão pode ser ajustada de duas formas... **segunda** forma:
 - Estação de origem envia RTS em potência máxima p_{max}
 - Estação de destino recebe o RTS e também envia CTS com potência p_{max}
 - Estação de origem ao receber CTS com potência p_r calcula $p_{desejado}$
 - Estação de destino calcula potência ACK igualmente, ao receber o RTS

$$p_{desejado} = \frac{p_{max}}{p_r} \times Rx_{thresh} \times c$$

Problema das Duas Alternativas

- Estação na zona de escuta de portadora do RTS/CTS
 - Saem da zona quando as estações comunicantes reduzem a potência de transmissão para envio de dados e ACK
 - Caso não escutem mais a portadora, essas estações podem causar colisões

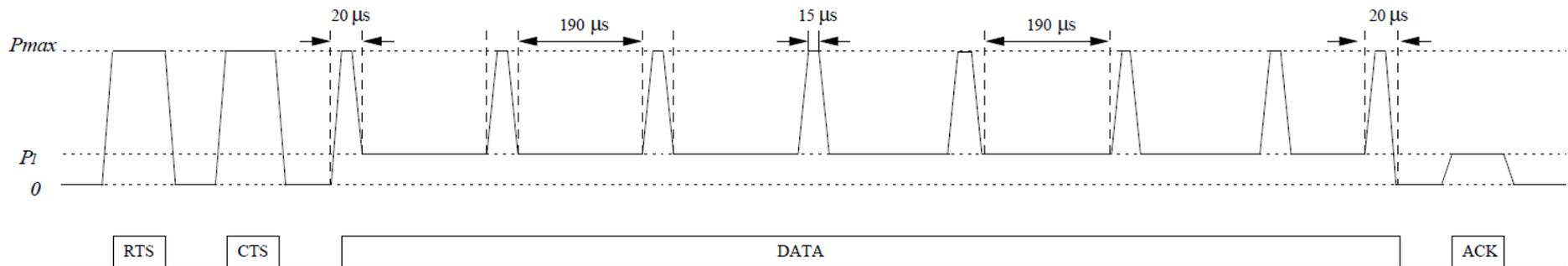
Problema das Duas Alternativas



**Estações A e H
passam a
considerar o meio
ocioso assim que
D reduz a
potência de
transmissão para
envio de dados
para E**

PCM: Power Control MAC

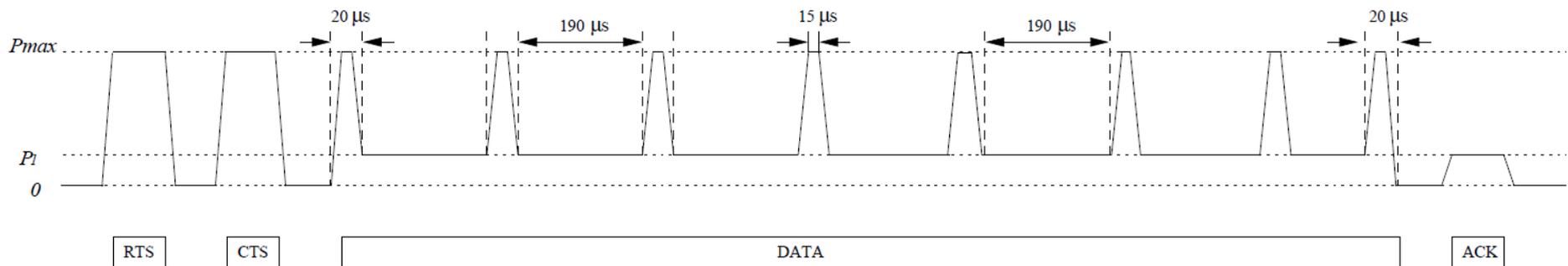
- Operação:
 - RTS/CTS são enviados na potência máxima P_{max}
 - Estação de origem pode enviar dados com potência mais baixa
 - Porém, periodicamente, a estação de origem transmite os dados com potência máxima
 - Estação de destino envia ACK com potência mais baixa



PCM: Power Control MAC

- Operação:
 - RTS/CTS são enviados na potência máxima P_{max}
 - Estação de origem pode enviar dados com potência mais baixa

Prevenção de colisões torna o PCM eficiente para economia de energia e não para reuso espacial...



Leitura Recomendada

- ANSI/IEEE Std 802.11, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", Padrão, 1999
- Sunghyun Choi, J. del Prado, Sai Shankar N e S. Mangold, "IEEE 802.11 e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation". Em IEEE ICC, 2003
- Rubinstein, M. G., Costa, L. H. M. K., Campista, M. E. M., Cunha, D. O., Amodei Jr., A., Velloso, P. B. e Duarte, O. C. M. B., "Analysis of Medium Access Control Protocols for Home Networks", Journal of Communication and Information Systems, 2007

Leitura Recomendada

- Saad Biaz e Shaoen Wu , "Rate Adaptation Algorithms for IEEE 802.11 Networks: A Survey and Comparison". Em IEEE ISCC, 2008
- Jeonghoon Mo, Hoi-Sheung Wilson So e Jean Walrand, "Comparison of Multichannel MAC Protocols". Em IEEE TMC, 2008
- S.-L. Wu, Y. Lin, Y.-C. Tseng e J.-P. Sheu, "A New MultiChannel MAC Protocol with On-Demand Channel Assignment for Mobile Ad Hoc Networks". Em ISPAN, 2000
- Jungmin So e Nitin Vaidya, "Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver". Em ACM MobiHoc, 2004

Leitura Recomendada

- A. Nasipuri, S. Ye, J. You e R.E. Hiramoto, "A MAC protocol for mobile ad hoc networks using directional antennas". Em IEEE WCNC 2000
- Young-Bae Ko, V. Shankarkumar e N.H. Vaidya, "Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks". Em IEEE Infocom 2000
- Masanori Takata, Masaki Bandai e Takashi Watanabe, "A MAC Protocol with Directional Antennas for Deafness Avoidance in Ad Hoc Networks". Em IEEE Globecom 2007

Leitura Recomendada

- Thanasis Korakis, Gentian Jakllari e Leandros Tassiulas, "A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad-hoc wireless networks". Em *ACM MobiHoc* 2003
- Gentian Jakllari, Joannis Broustis, Thanasis Korakis, Srikanth V. Krishnamurthy e Leandros Tassiulas, "Handling Asymmetry in Gain in Directional Antenna Equipped Ad Hoc Networks". Em *IEEE PIMRC* 2005
- Eun-Sun Jung e Nitin H. Vaidya, "A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks". Em *ACM MobiCom* 2002