

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 Spectrum*)
 - 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, 5.5, 11	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	1, 2, 5.5, 11	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:

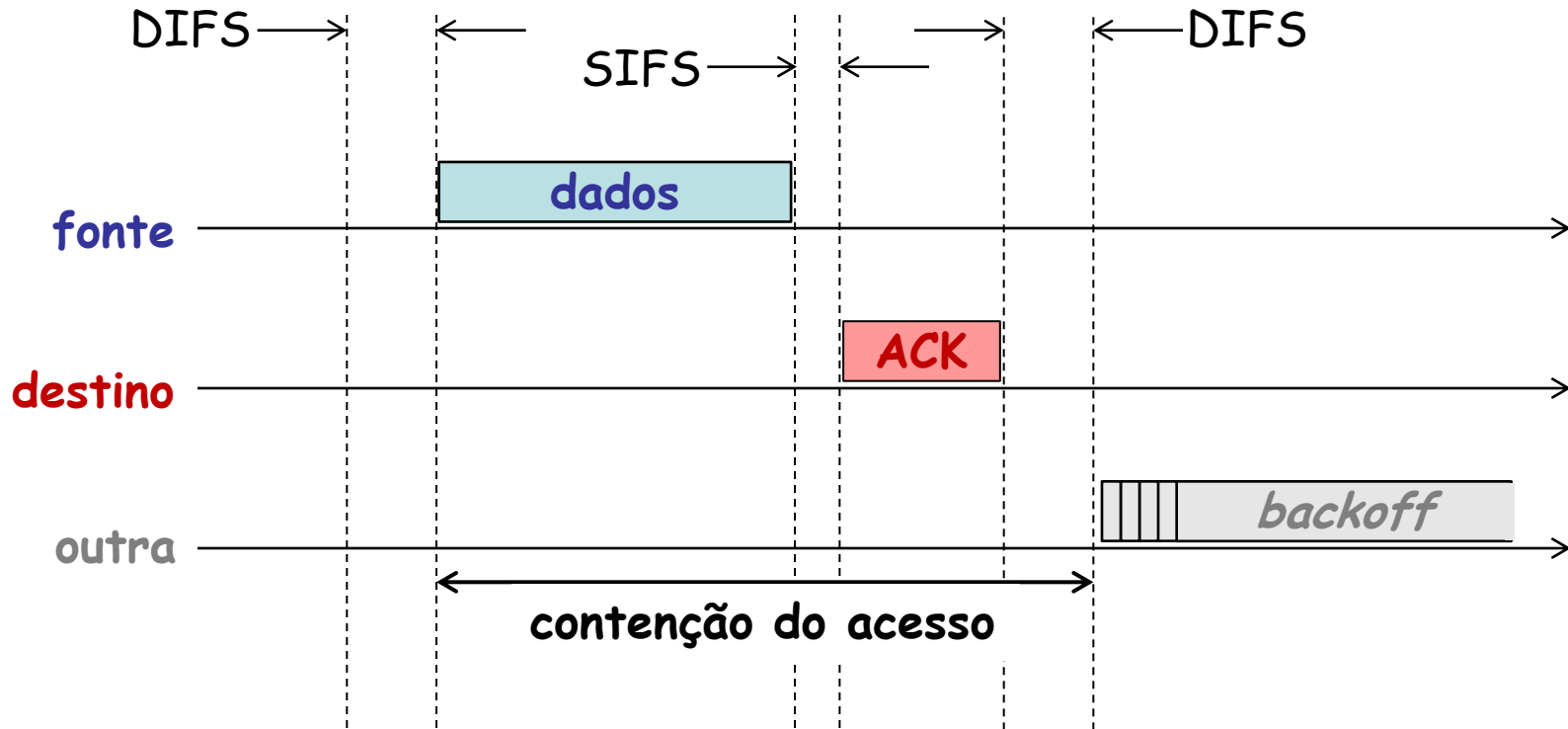
**O IEEE 802.11 usa o CSMA/CA
(Carrier Sense Multiple Access with
Collision Avoidance)**

- 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
 - 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

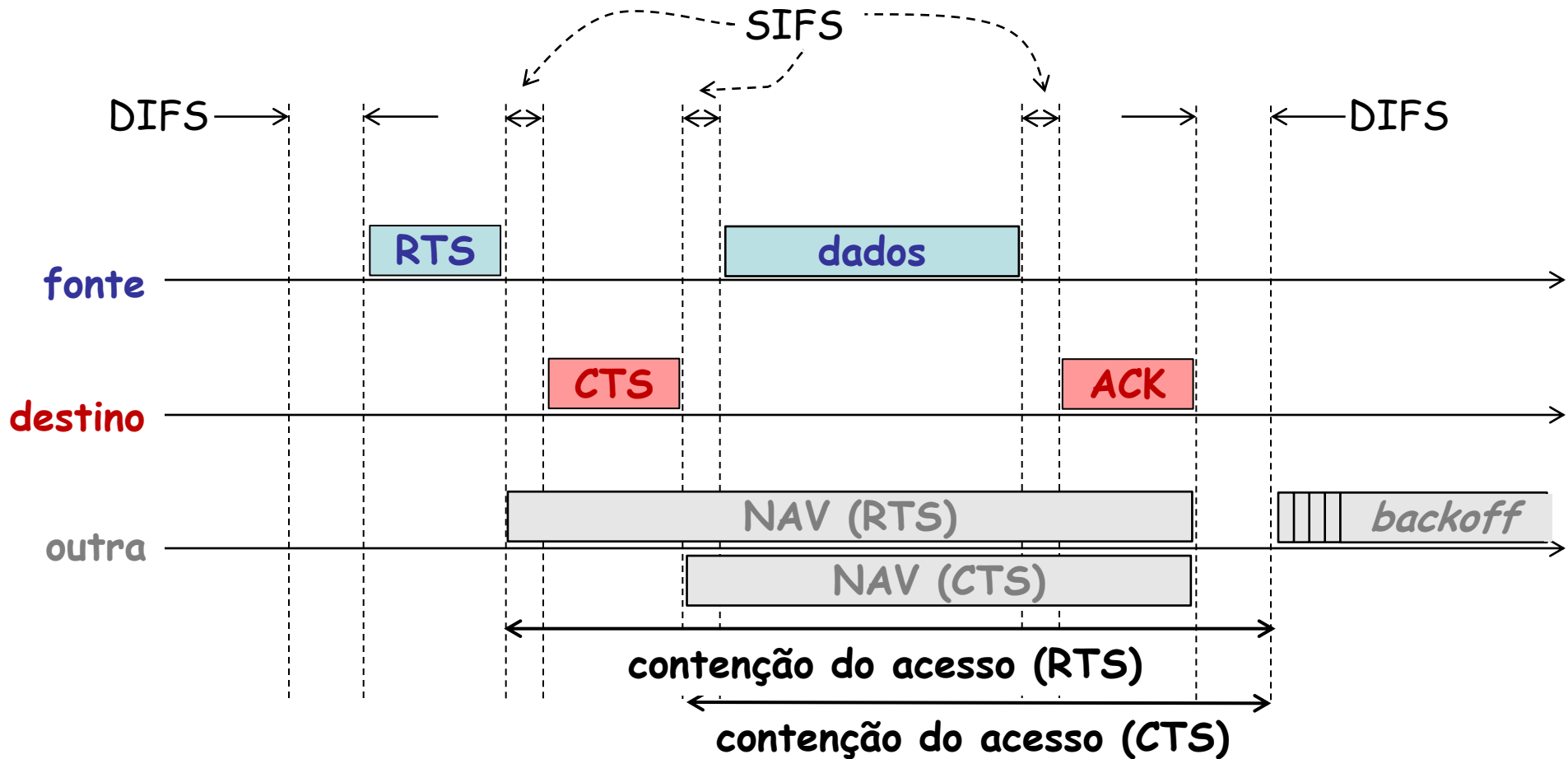
DCF Modo Básico

- **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
 - $NAV = \text{tempo CTS} + SIFS + \text{tempo dados} + SIFS + \text{tempo ACK}$
 - Quando em um quadro CTS
 - $NAV = \text{tempo dados} + SIFS + \text{tempo ACK}$
 - Quando em um quadro de dados
 - $NAV = SIFS + \text{tempo ACK}$
- 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

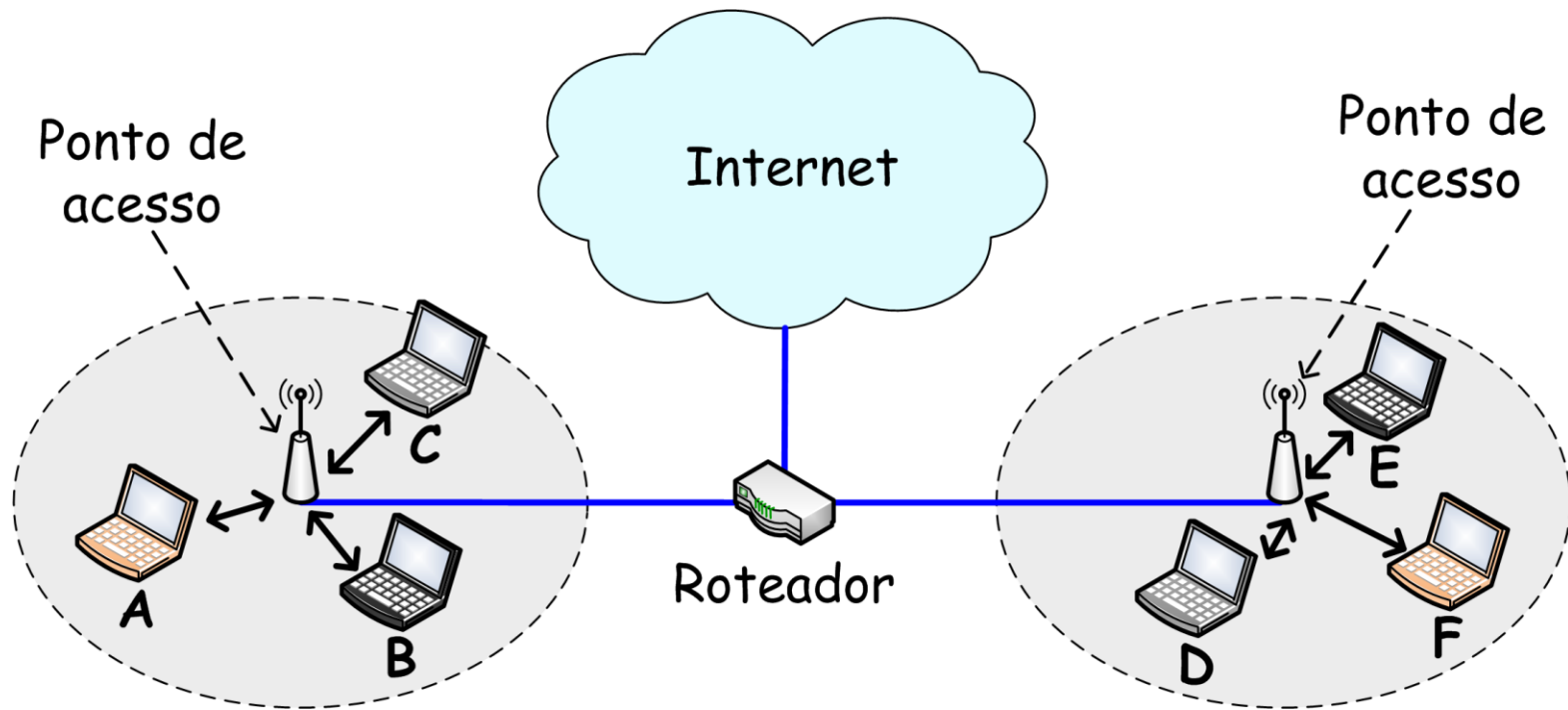
Operação do IEEE 802.11

- 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

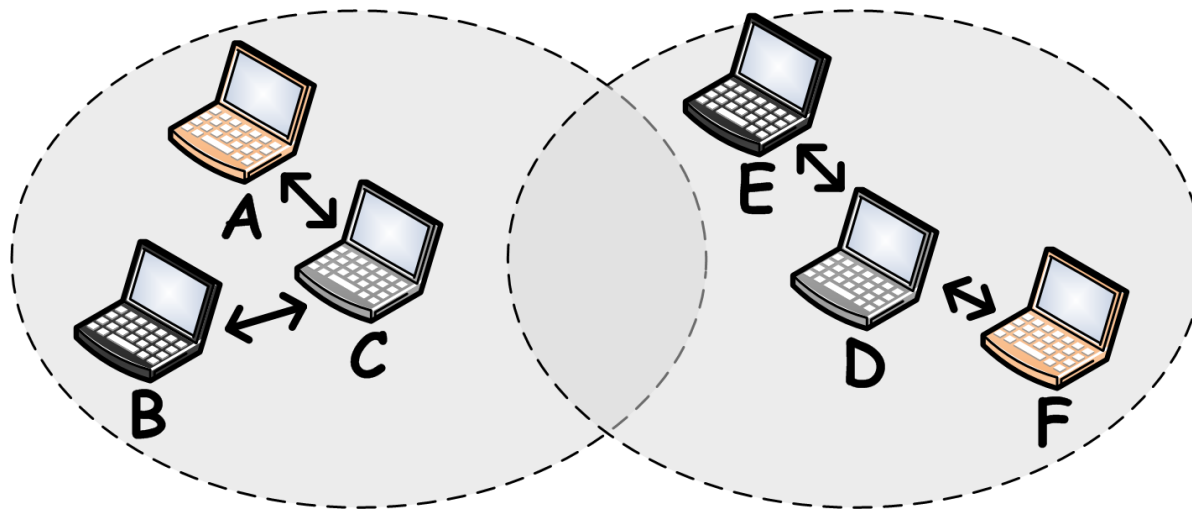


Redes Ad Hoc (ou Sem Infraestrutura)

- 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)

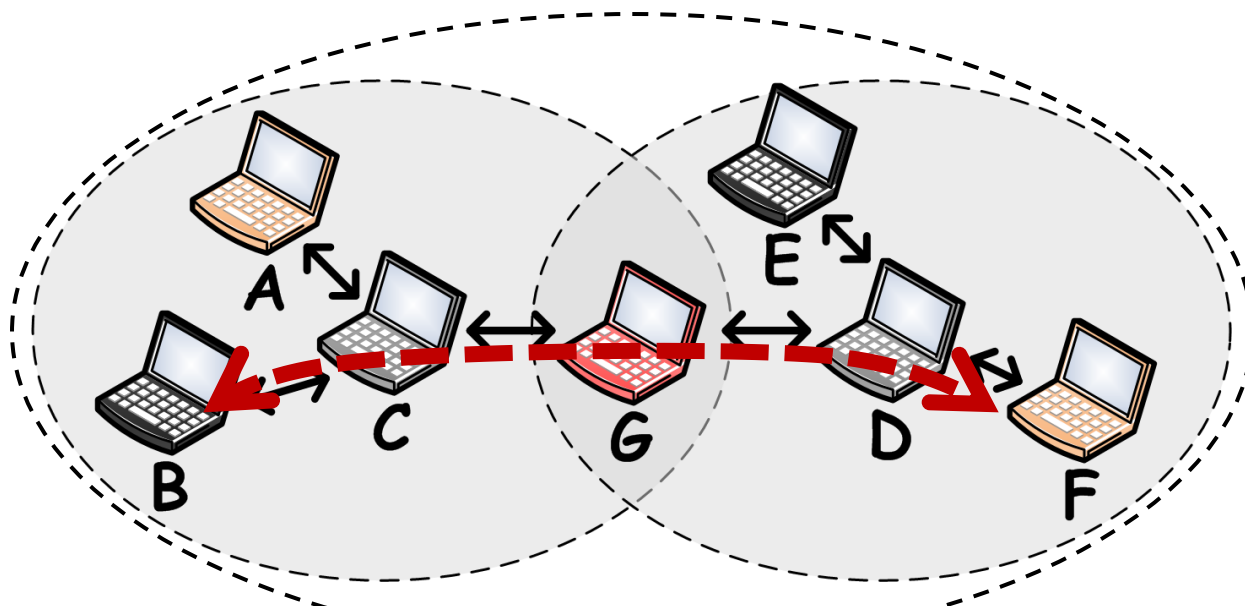
- Comunicação direta



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)

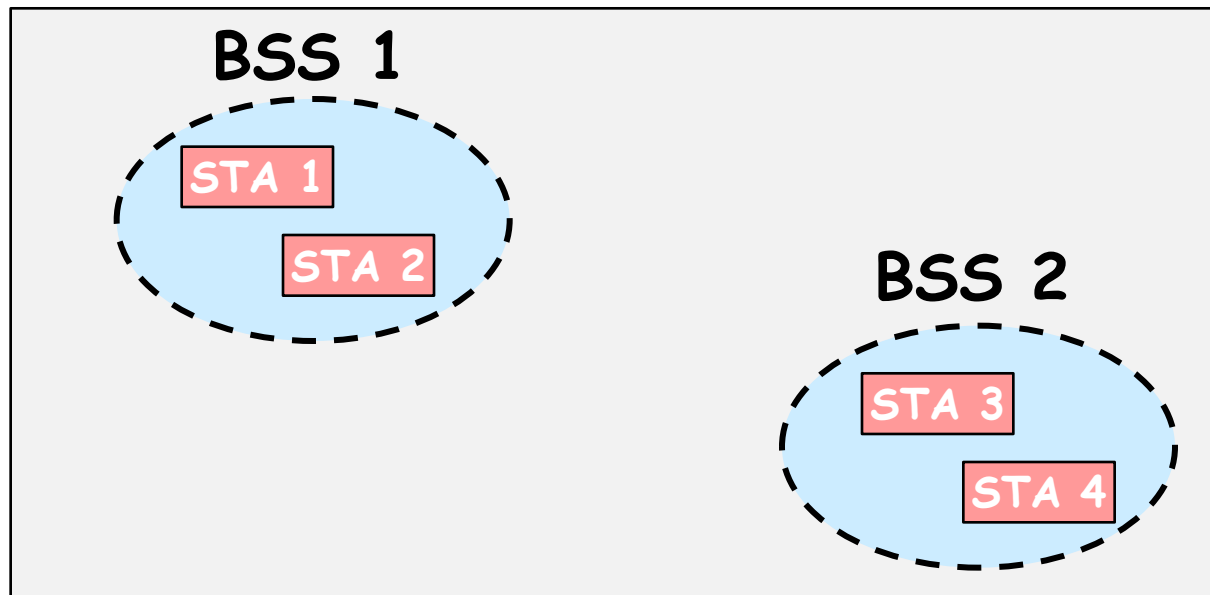
- Principais aplicações
 - Ambientes onde:
 - Não há infraestrutura
 - A infraestrutura existente não é confiável
 - Exemplos
 - Catástrofes
 - Guerra
 - Áreas rurais
 - Etc.

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
<i>Ad hoc</i> 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

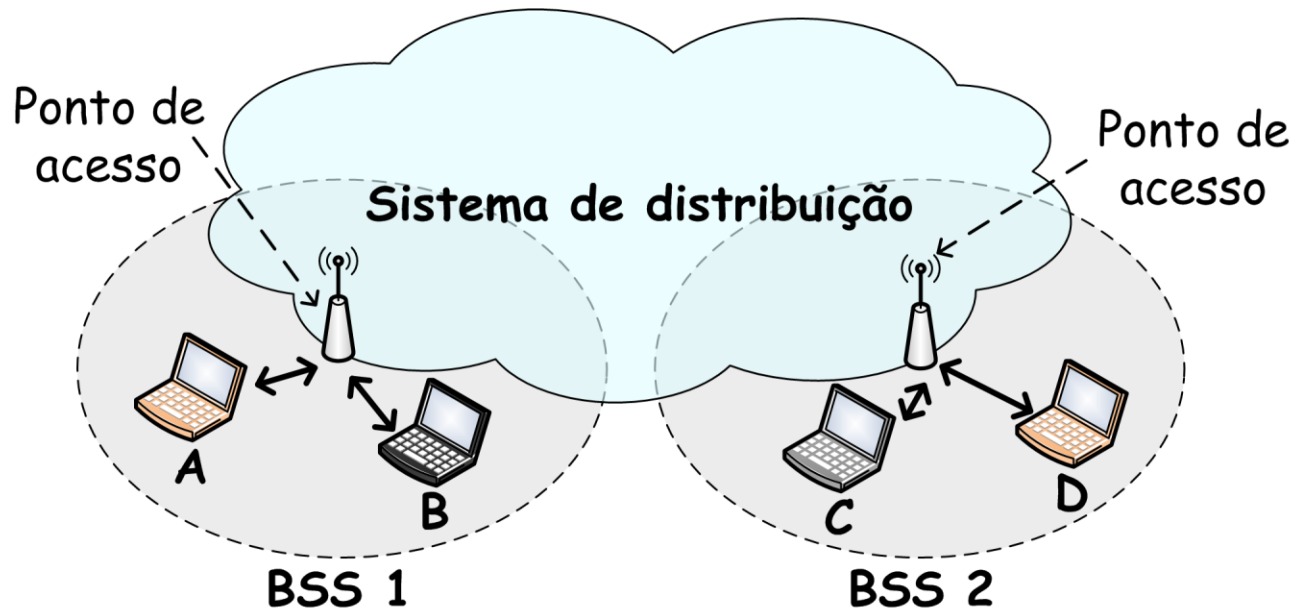


Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- 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

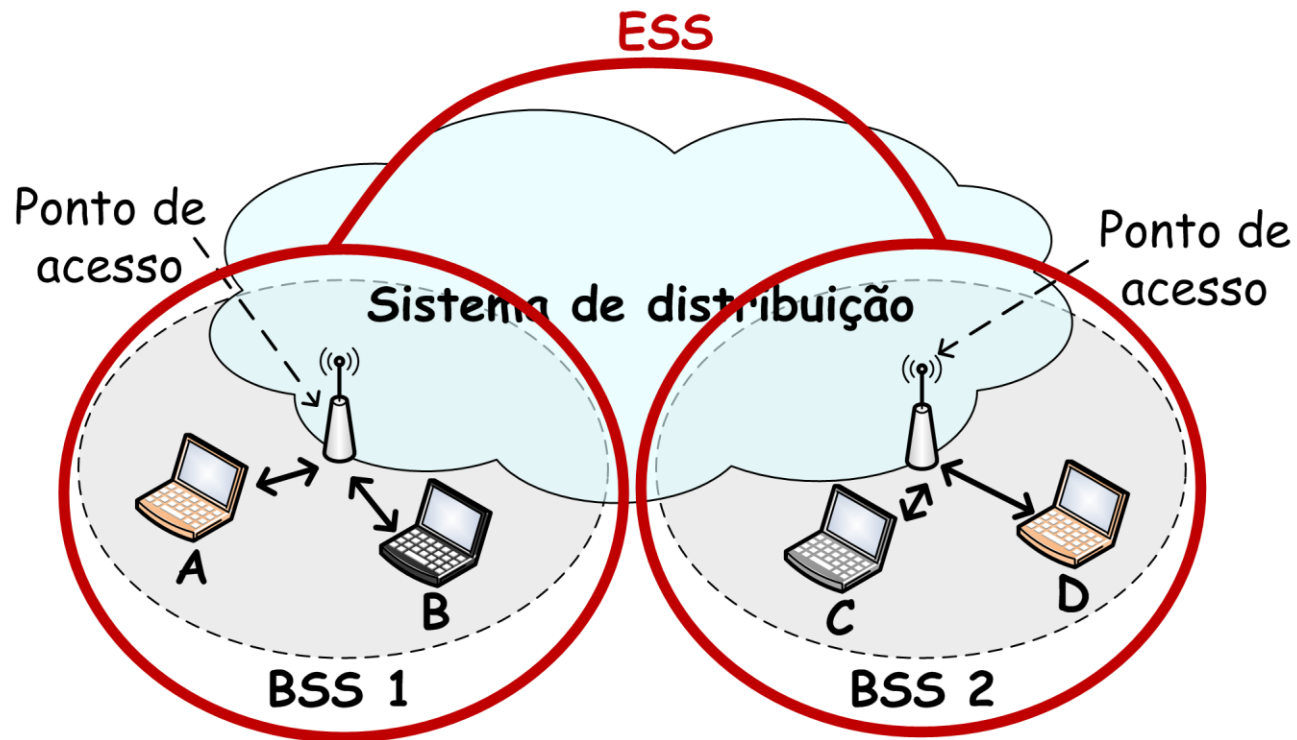


Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Sistemas de distribuição provêem suporte a dispositivos móveis
 - Oferecem serviços de mapeamento de endereços e integração transparente de múltiplos BSSs
- Pontos de acesso são estações que provêem acesso ao sistema de distribuição

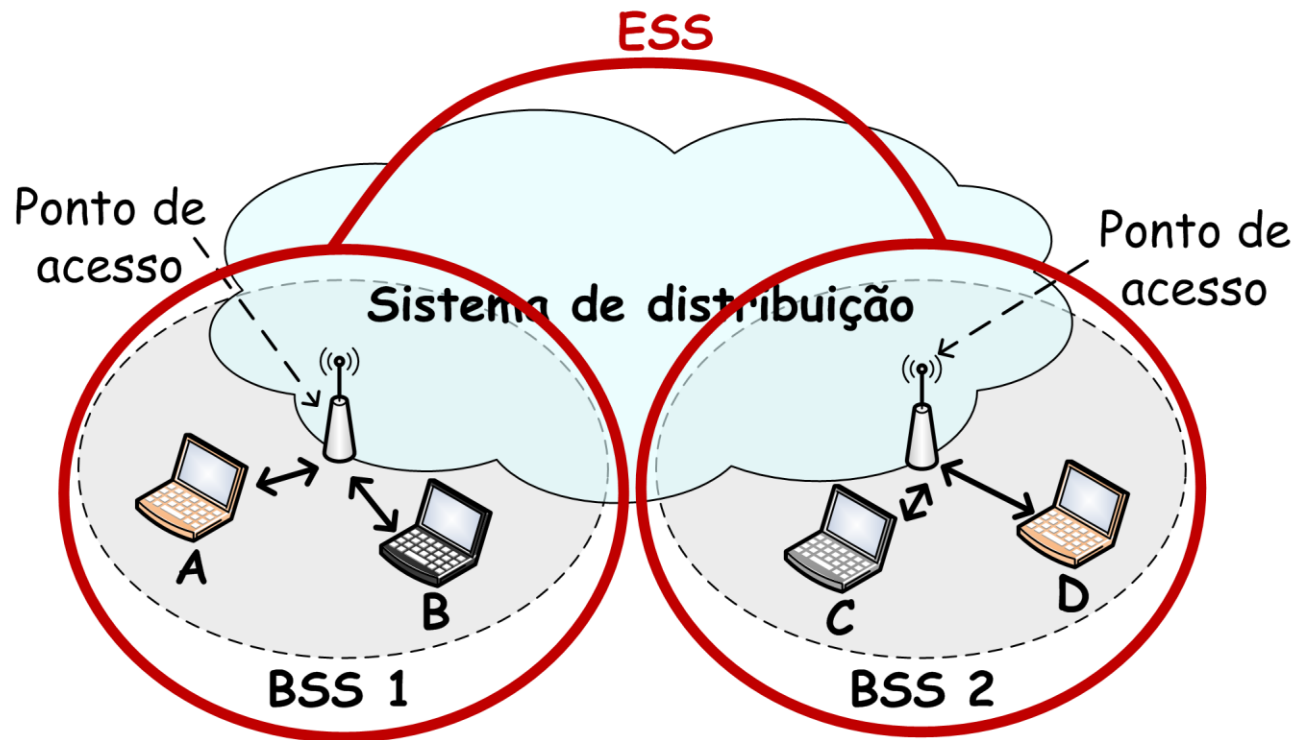
Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

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



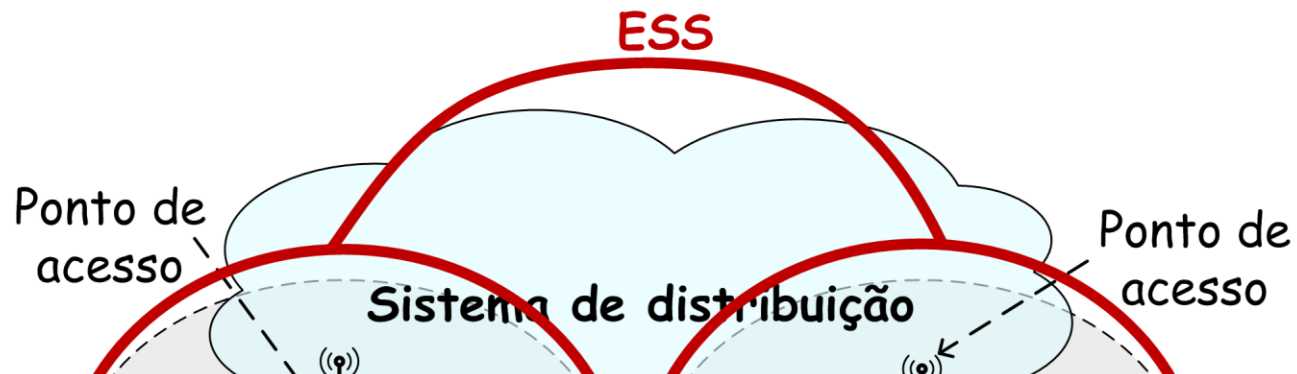
Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Rede ESS é vista como a mesma na camada LLC
 - 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

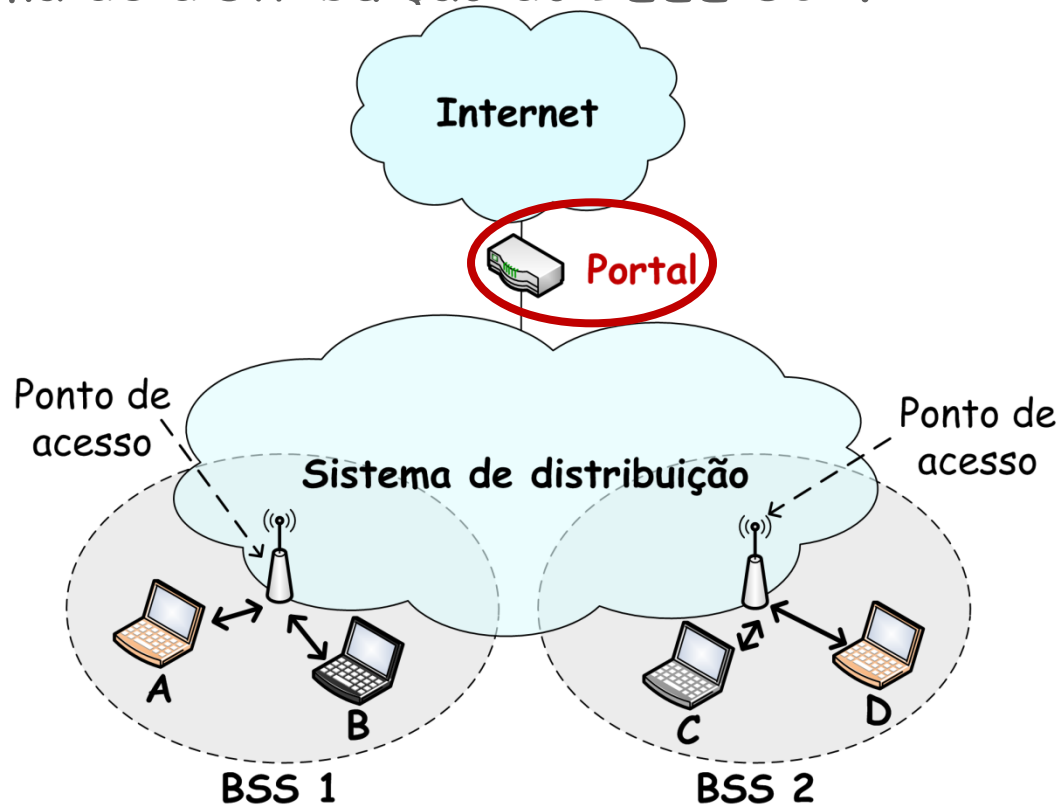
- Rede ESS é vista como a mesma na camada LLC
 - Estações na mesma ESS podem se comunicar e se mover de uma BSS para outra dentro da mesma ESS



As BSSs devem estar no mesmo segmento lógico de rede, ou seja, na mesma sub-rede IP

Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- Portal
 - Interface entre uma rede não IEEE 802.11 com o sistema de distribuição do IEEE 802.11



Componentes da Arquitetura IEEE 802.11

- BSSs podem se sobrepor parcialmente
 - Usado para garantir cobertura contígua
- 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

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

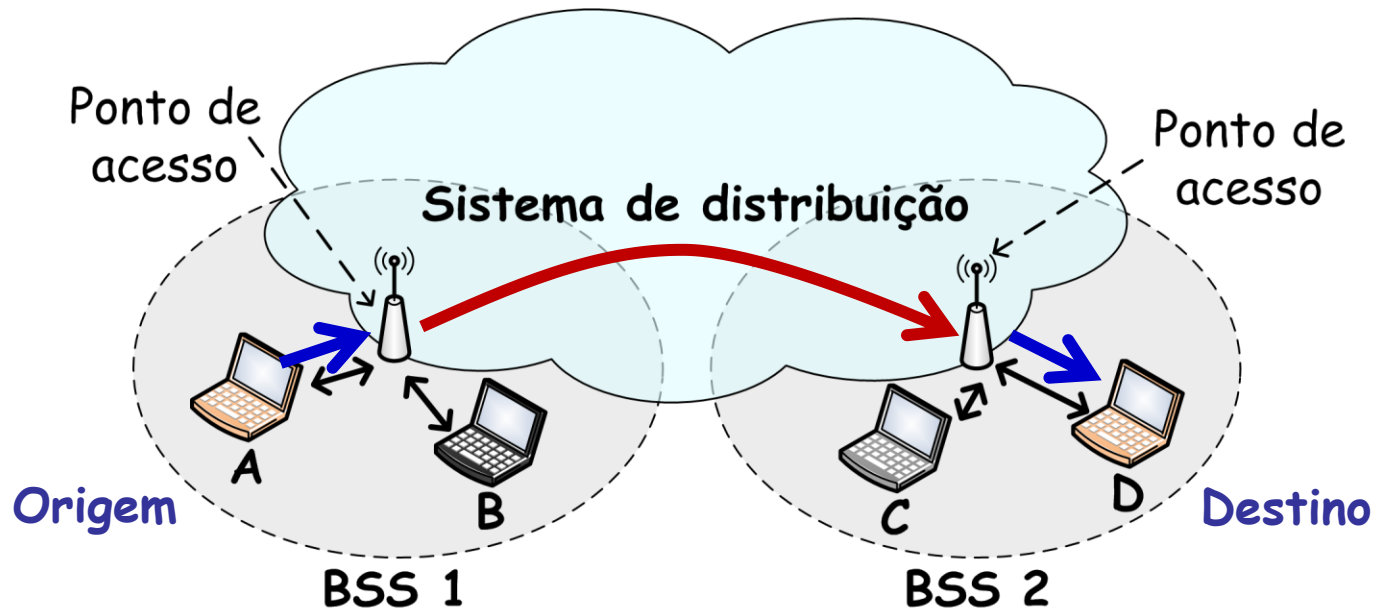
- Serviços dos sistemas de distribuição (*Distributed System Set - DSS*)
 - Distribuição
 - Integração
 - Associação
 - Reassociação
 - Desassociação
- Serviços das estações (*Station Set - SS*)
 - Autenticação
 - Desautenticação
 - Privacidade
 - Entrega do quadro

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11

- Os 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

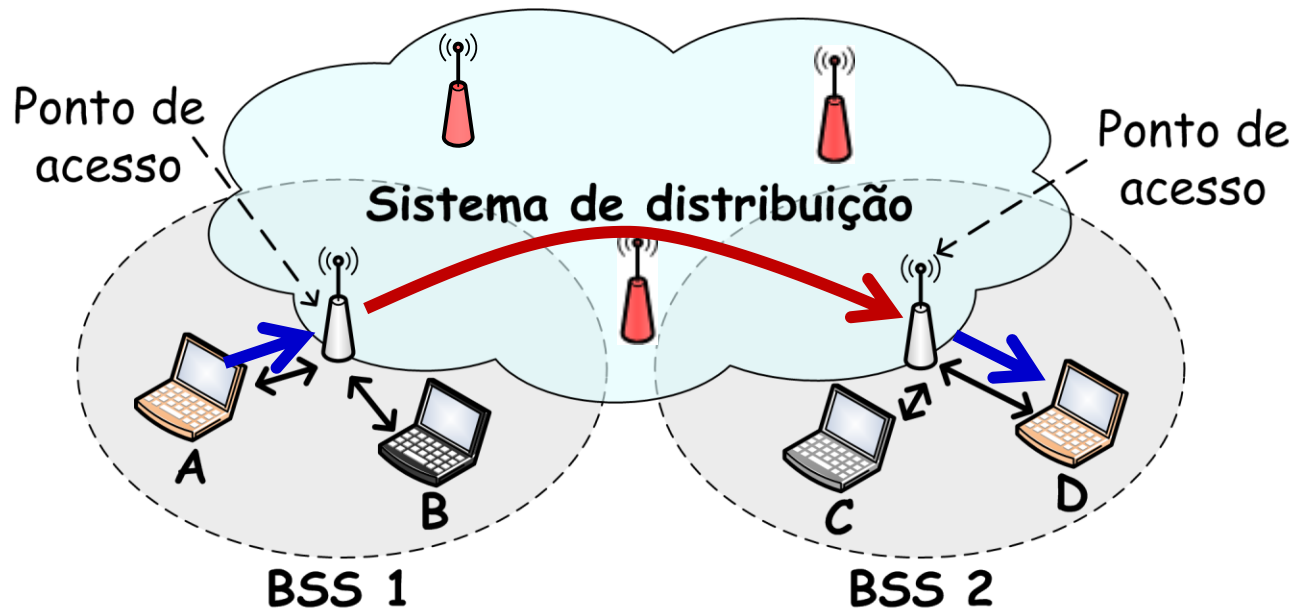
Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- 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

- *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 é responsável por fazer o que for preciso para entregar um quadro na rede correta
 - Incluindo o meio necessário e a tradução 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 dados
 - Associação requer 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 distribuição através de um ponto de acesso
 - Estações aprendem que os pontos de acesso estão presentes e, então, requisitam associação

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- Reassociação
 - Reassociação é necessária por questões de mobilidade
 - Serviço de reassociação é invocada quando uma estação muda de uma associação a um ponto de acesso para outro
 - 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
 - Serviço de reassociação permite que os atributos da associação sejam alterados
 - Serviço de reassociação é iniciado sempre pela estação

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - DSS

- Desassociação
 - Desassociação é 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
 - Desassociação é uma notificação que pode ser enviada tanto pelo ponto de acesso quanto pela estação
 - Desassociação não pode ser recusada
 - Serviços de mobilidade não dependem de desassociação prévia

Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - SS

- Características intrínsecas do meio físico cabeado:
 - Autenticidade
 - Obtido pela interconexão de duas estações através de um cabo
 - Privacidade
 - Obtido pelo confinamento do meio cabeado

Como conseguir as mesmas características nas redes sem-fio?

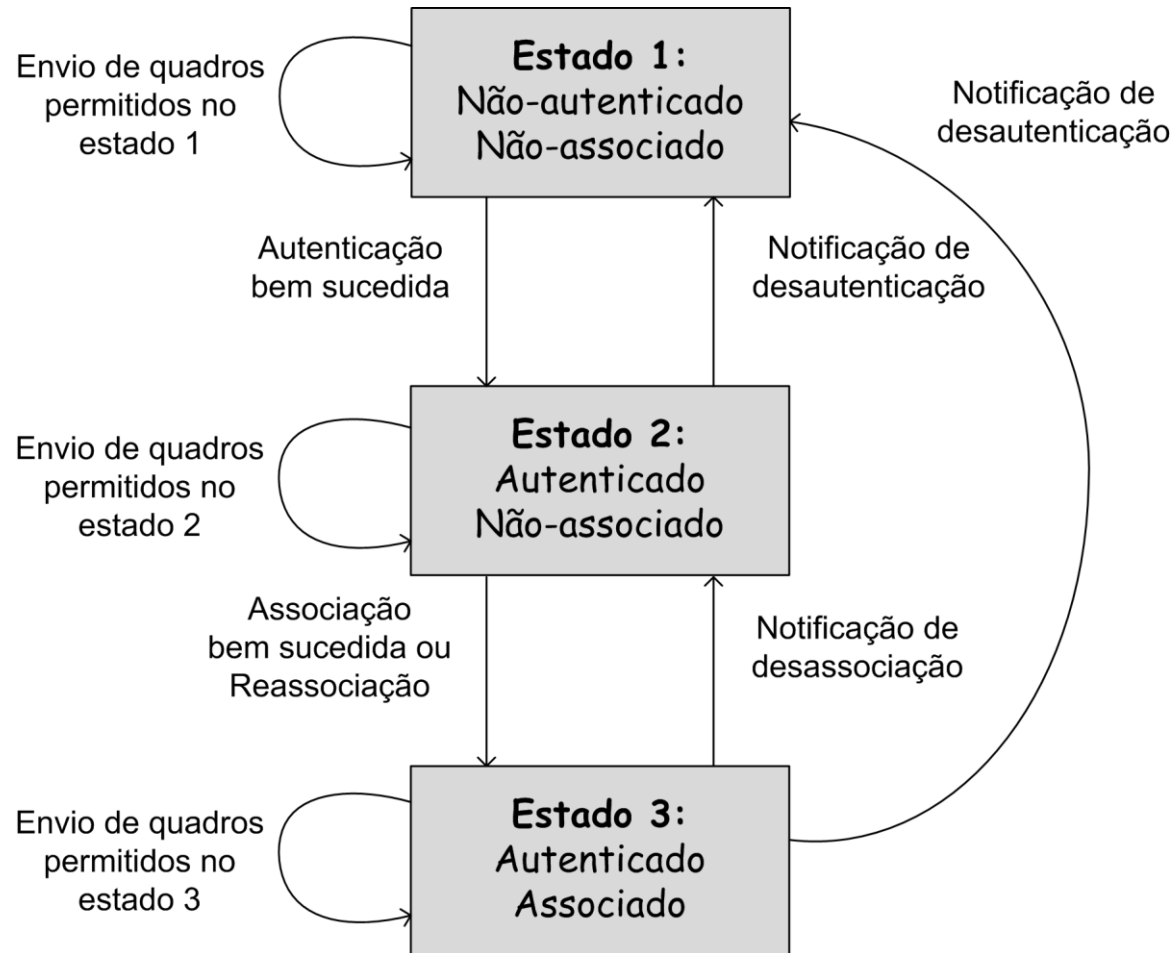
Serviços da Arquitetura IEEE 802.11 - SS

- 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 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

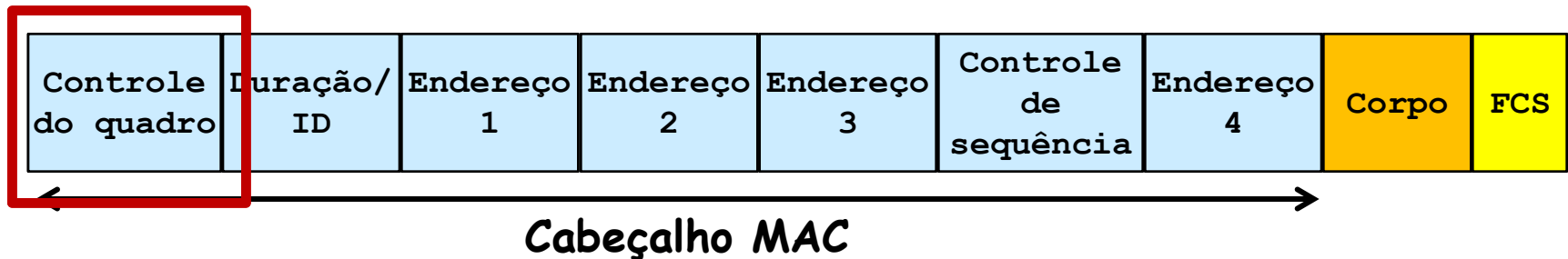
- Transmitido em taxa variável
 - Dados
- Transmitidos em uma taxa básica
 - RTS
 - CTS
 - ACK

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

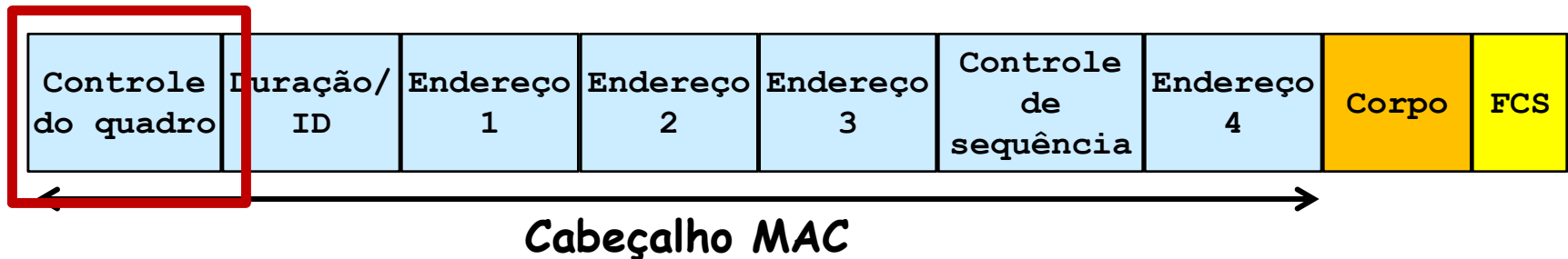
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- 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



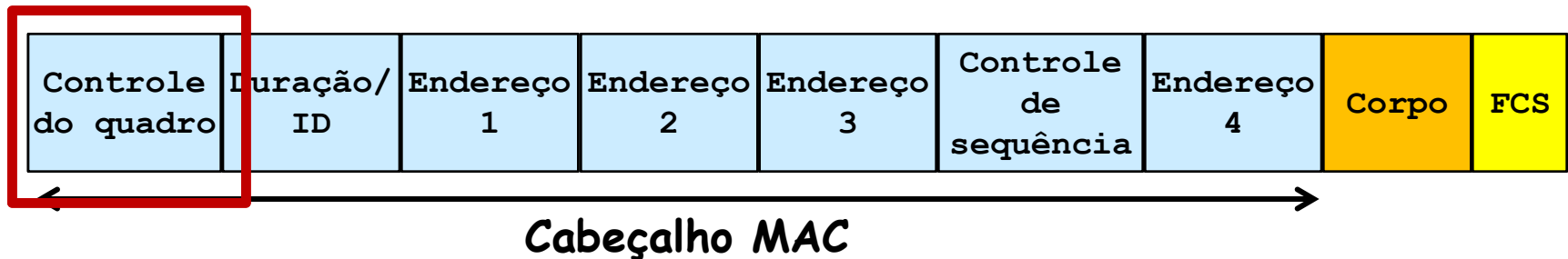
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- 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



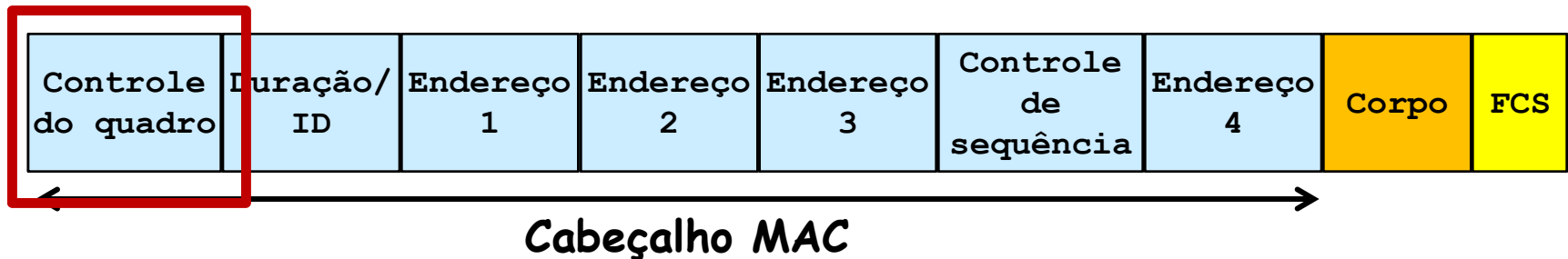
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- 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



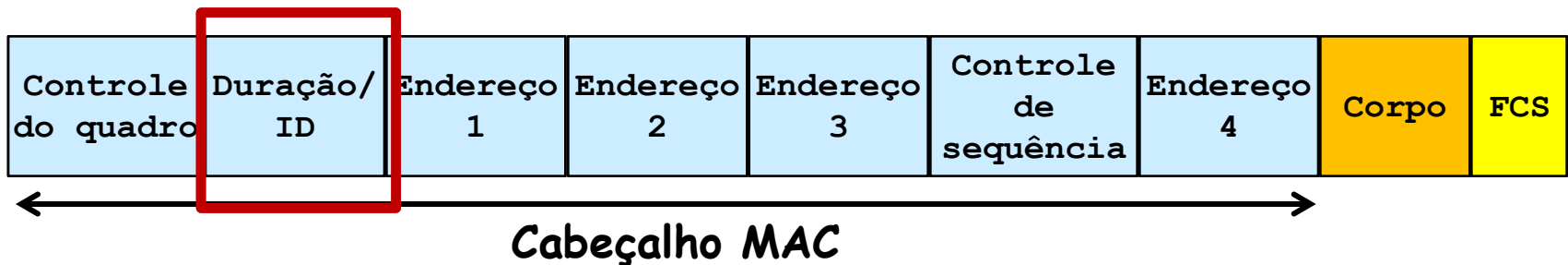
Formato dos Quadros do IEEE 802.11

- 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)
 - Ordem (1 bit)
 - Sequência de quadros deve ser processada em ordem



Formato dos Quadros do IEEE 802.11

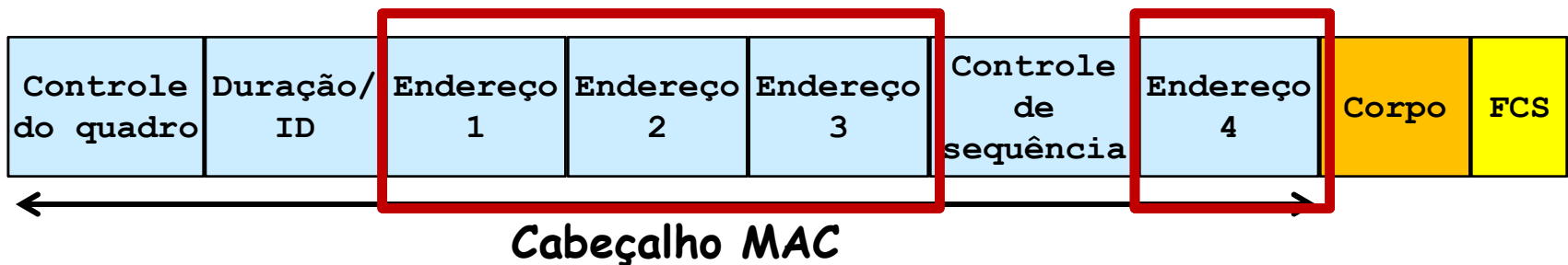
- Duração (2 Bytes)
 - Tempo de ocupação pelo quadro e sua confirmação
 - Usado no NAV



Formato dos Quadros do IEEE 802.11

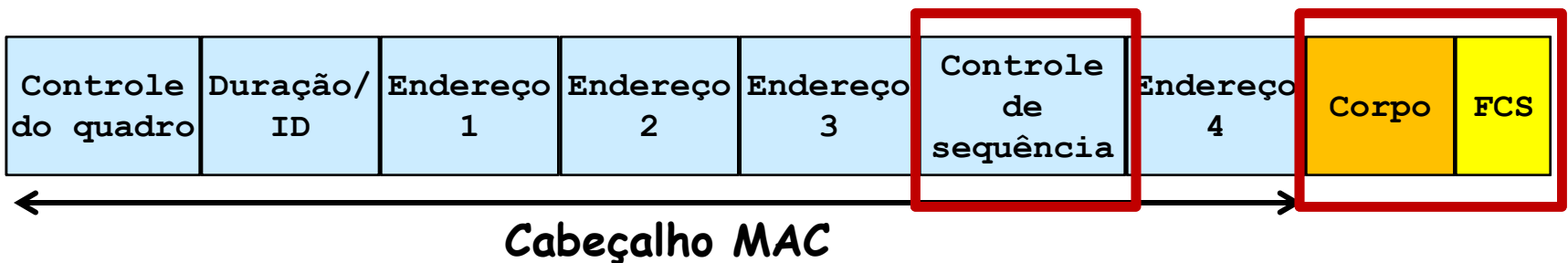
- Endereços 1, 2, 3 e 4 (6 Bytes cada um)
 - Podem ser:
 - Origem ou destino do quadro
 - Receptor ou transmissor
 - Origem e destino no salto atual
 - BSSID
 - Identificação do BSS
 - » Infraestruturado: Endereço do ponto de acesso
 - » Ad hoc: Valor aleatório

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)
 - Número de sequência do fragmento (4 bits)
- 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

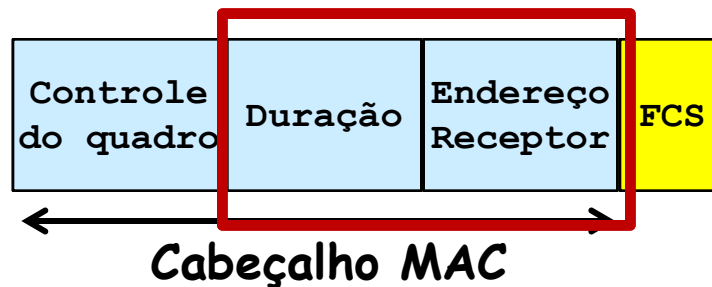
Formato dos Quadros de CONTROLE do IEEE 802.11

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



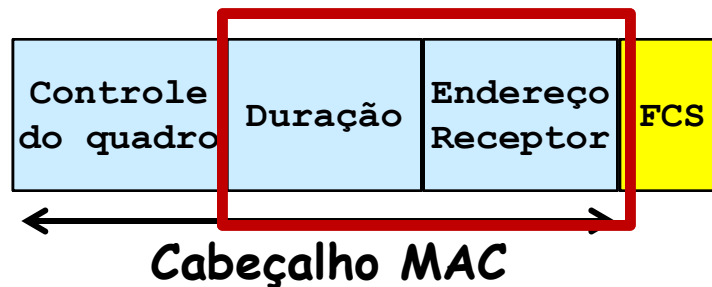
Formato dos Quadros de CONTROLE do IEEE 802.11

- 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



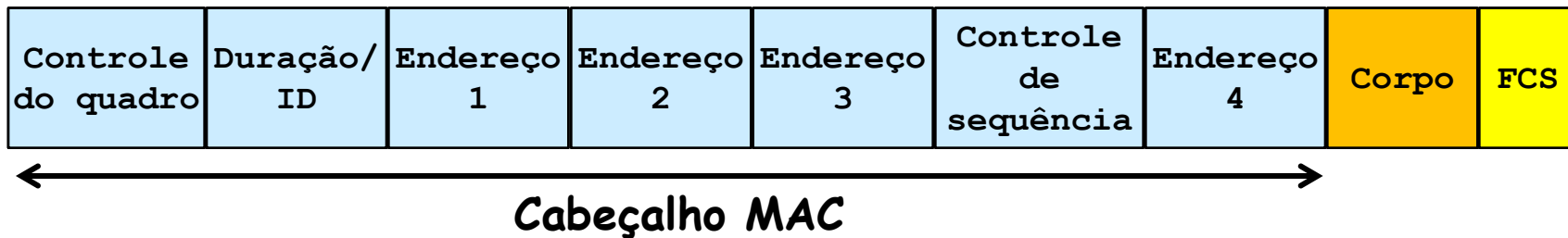
Formato dos Quadros de CONTROLE do IEEE 802.11

- 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

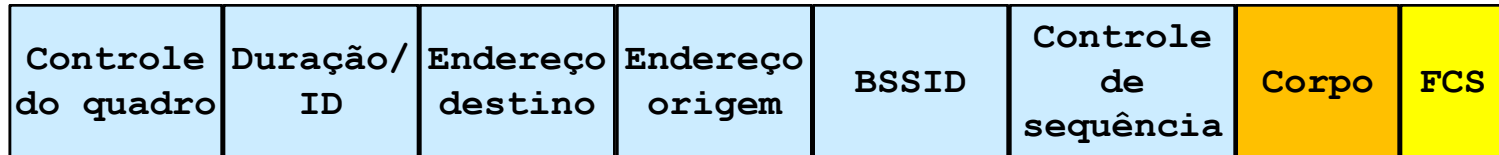
- Independente do subtipo
 - Porém, endereços usados dependem dos campos Para DS e De DS



Formato dos Quadros de DADOS do IEEE 802.11

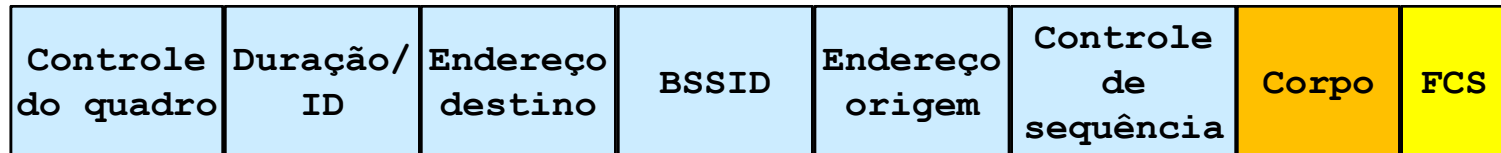
- Ad Hoc

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



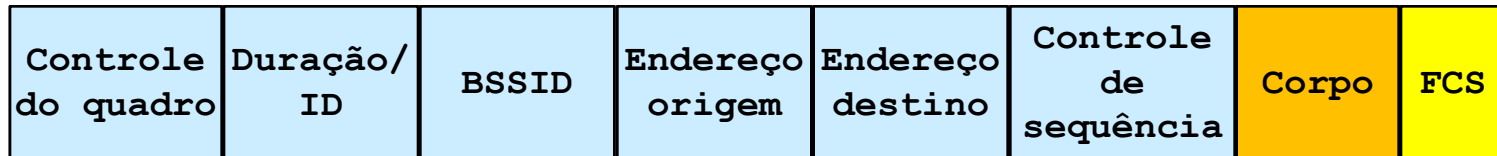
- Infraestruturada vindo de um ponto de acesso

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

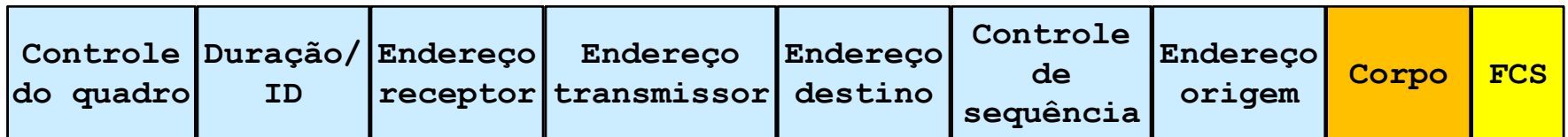


Formato dos Quadros de DADOS do IEEE 802.11

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

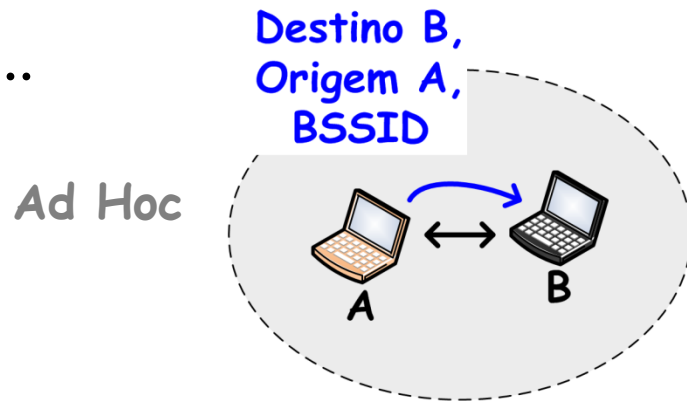


- Infraestruturada, dentro do DS sem-fio
 - Para DS = 1, De DS = 1
 - Endereços de receptor, transmissor, destino e origem

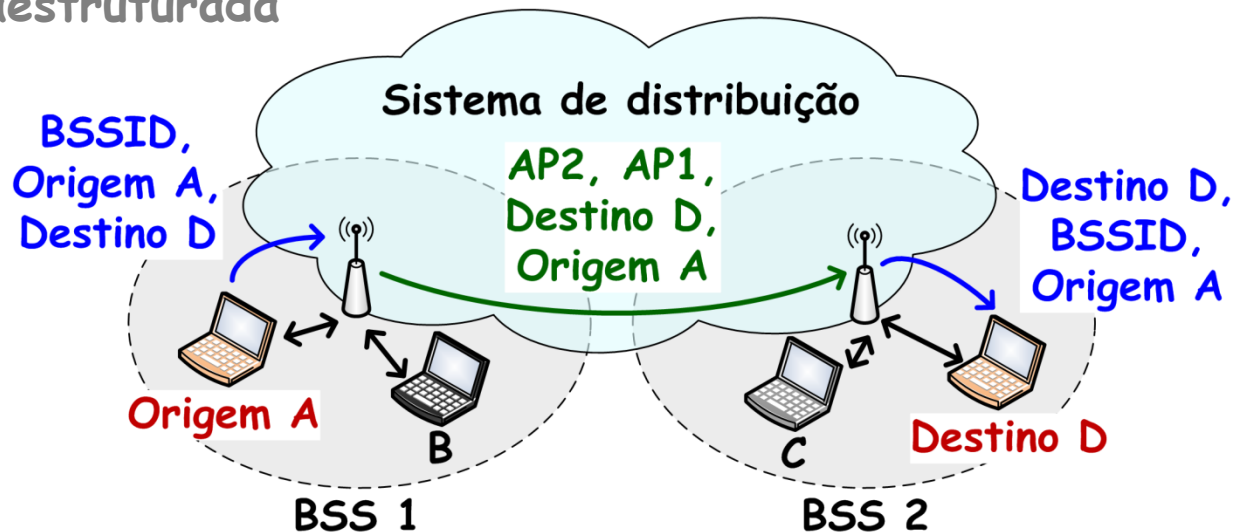


Formato dos Quadros de DADOS do IEEE 802.11

- Resumindo...



Infraestruturada



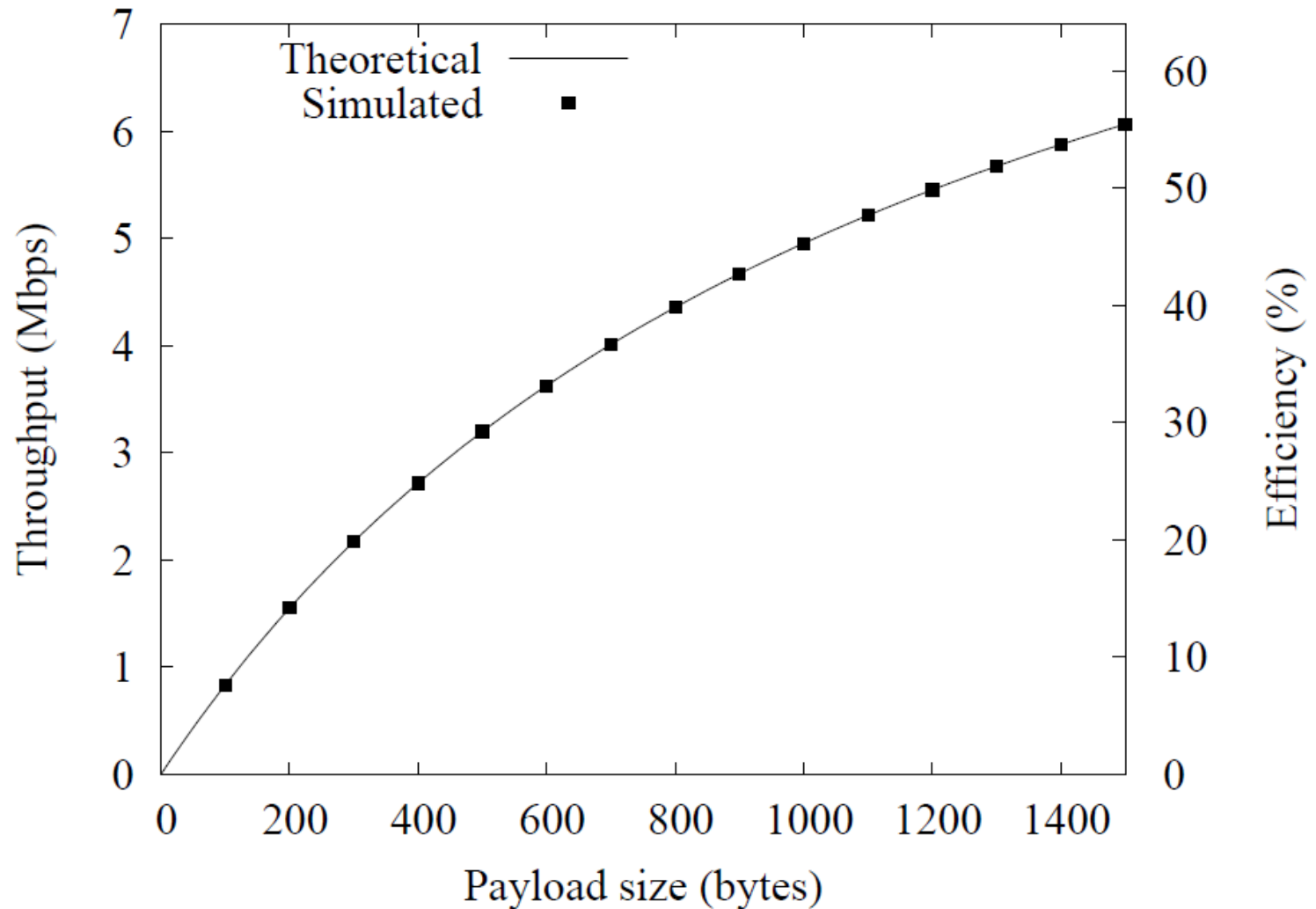
Capacidade do IEEE 802.11b

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

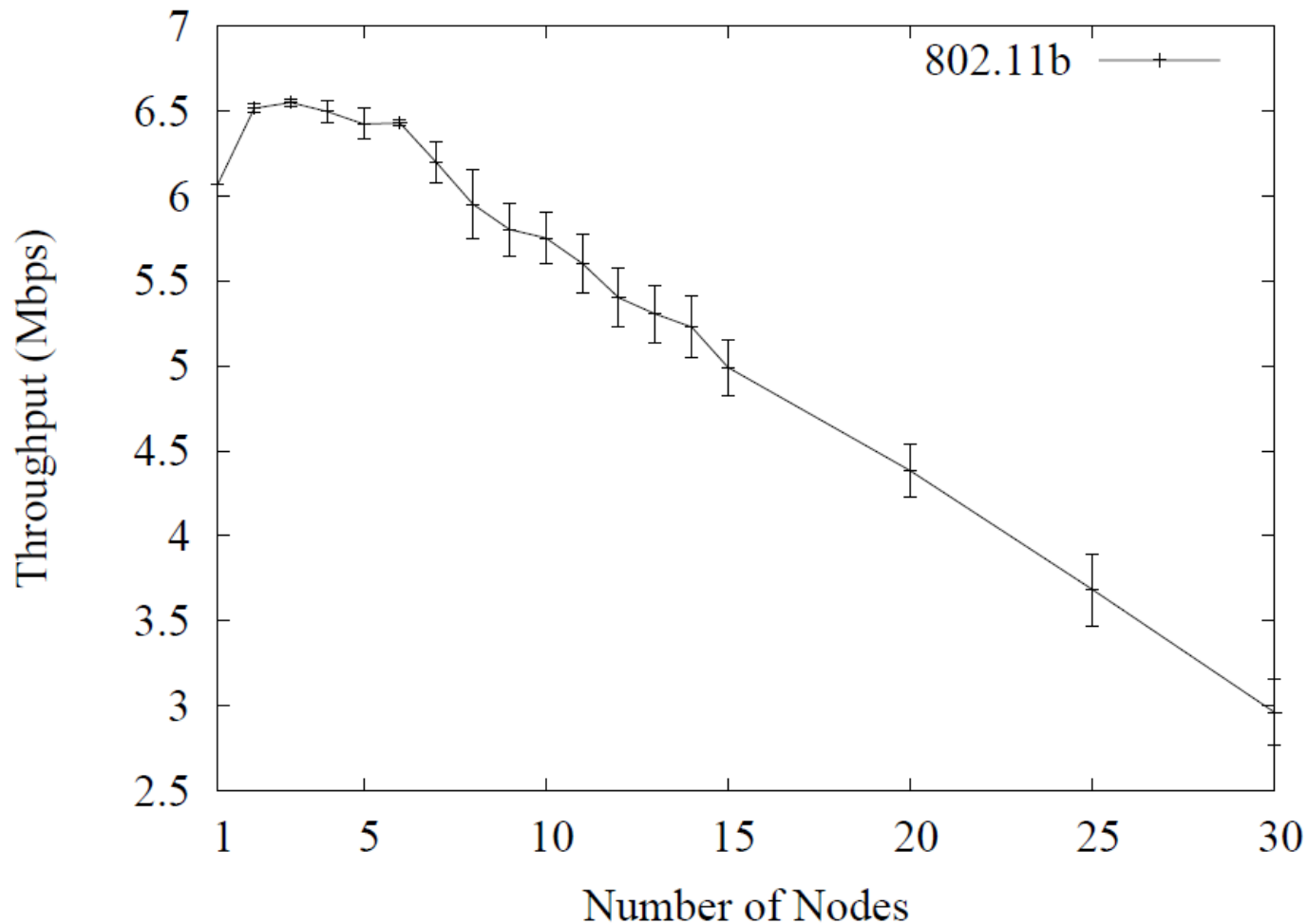
$$T_{802.11b} = 50 + \frac{31}{2} \times 20 + 192 + \frac{(L_{DATA} + 28)}{11} \times 8 + 10 + 192 + \frac{14}{1} \\ \times 8 \text{ (\mu s)}$$

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

Capacidade do IEEE 802.11b



Capacidade do IEEE 802.11b



Capacidade do IEEE 802.11g

$$T_{802.11g} = T_{DIFS} + \frac{CW_{min}}{2} \times T_{slot} + T_{PHY} + N_{SYM} \times T_{SYM} + T_{EXT} + T_{SIFS}$$

$$+ T_{PHY} + \left\lceil \frac{16 + 8 \times L_{ACK} + 6}{N_{DBS}} \right\rceil \times T_{SYM} + T_{EXT} (\mu s)$$

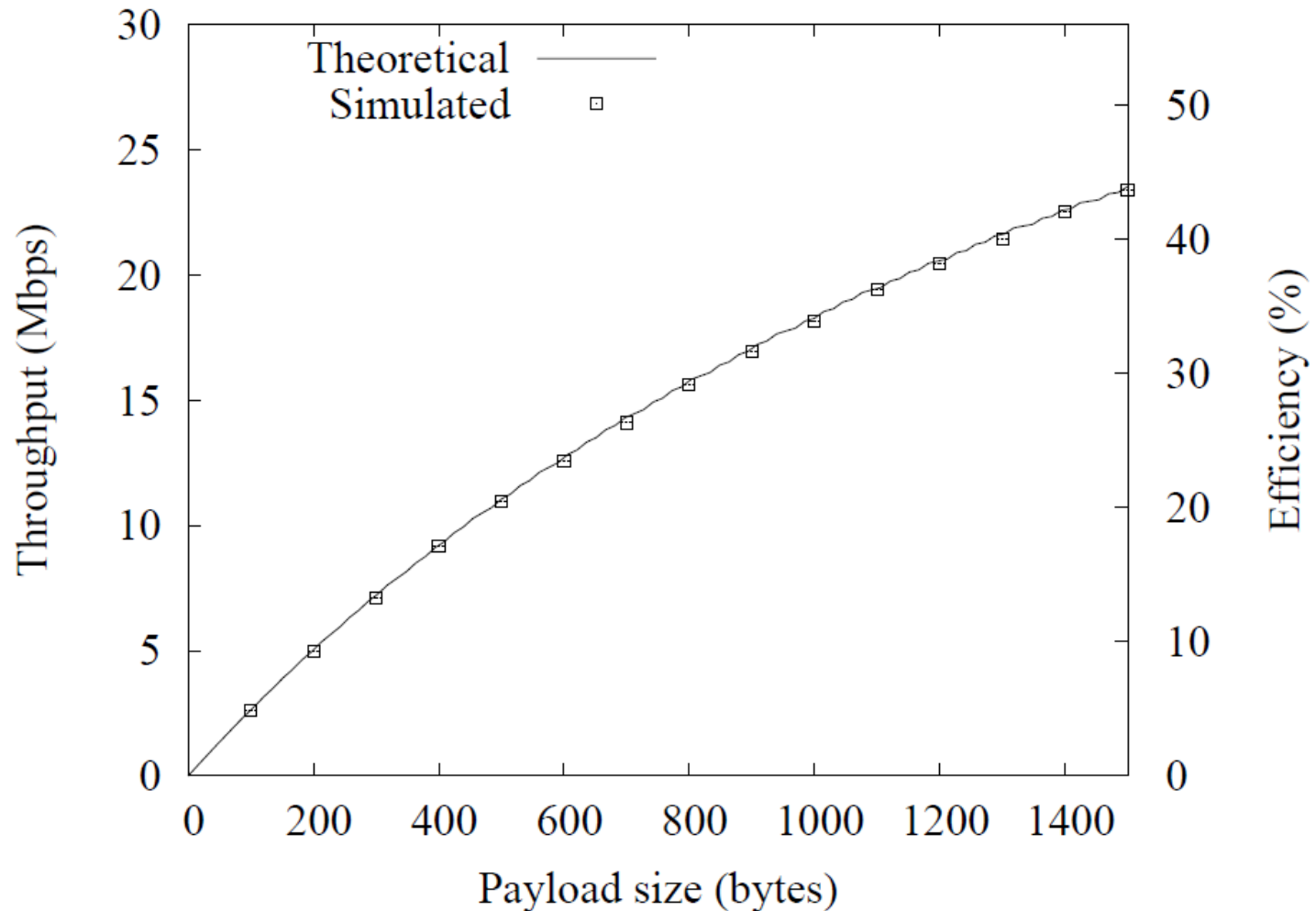
$$N_{SYM} = \left\lceil \frac{16 + 8 \times (L_{DATA} + 28) + 6}{N_{DBS}} \right\rceil$$

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

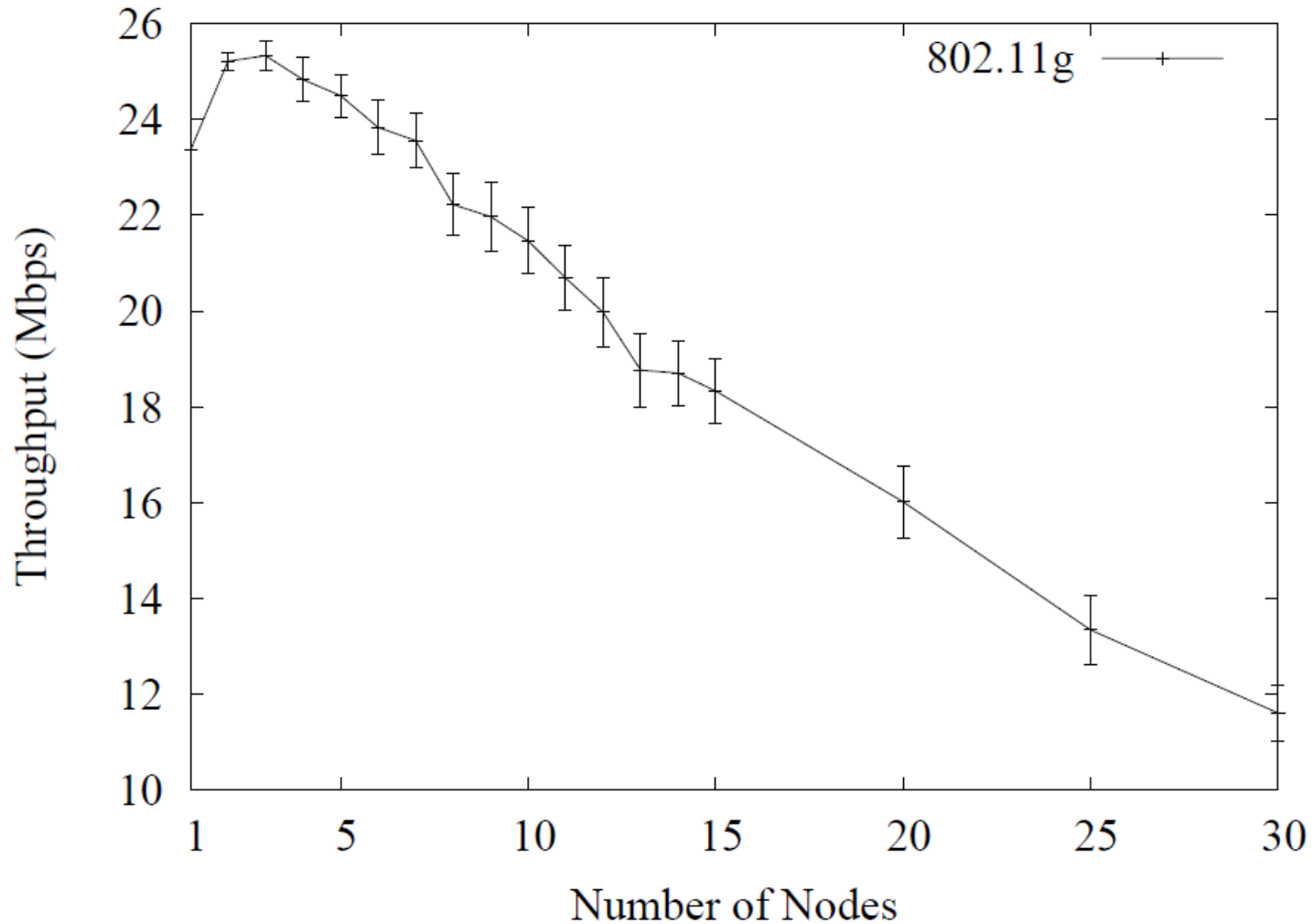
$$+ 10 + 20 + \left\lceil \frac{16 + 8 \times 14 + 6}{24} \right\rceil \times 4 + 6 (\mu s)$$

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

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

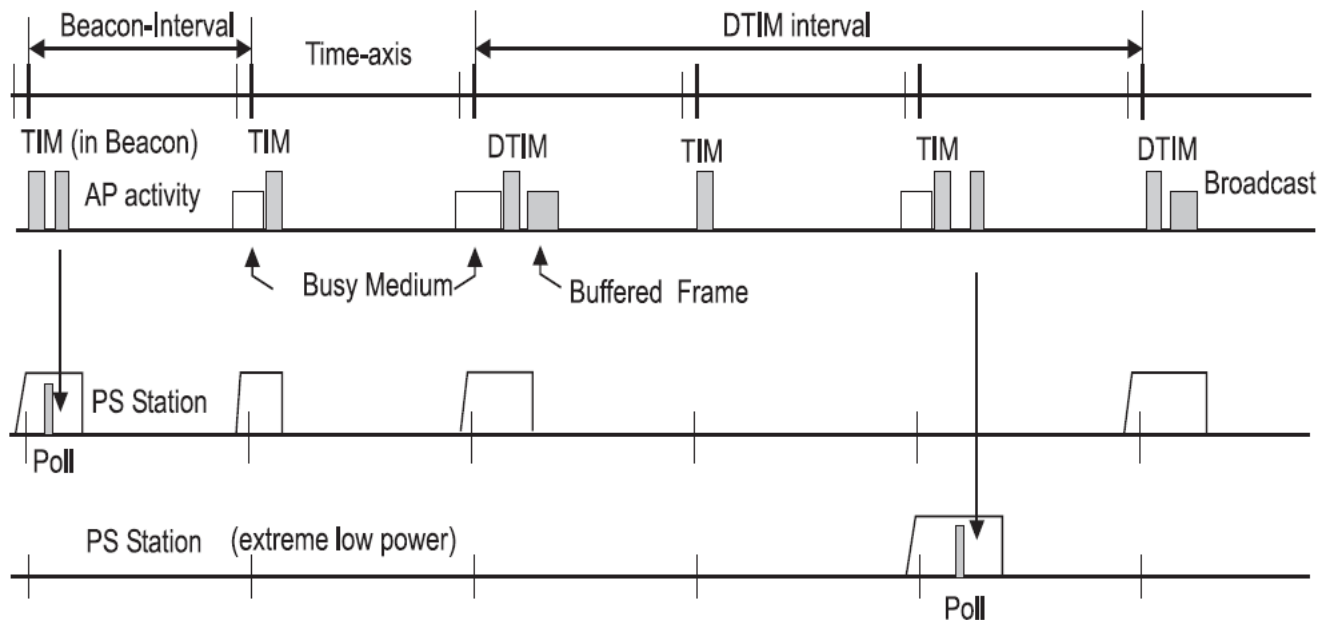
Economia de Energia no Modo Infraestruturado

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-POLL 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 como resposta a um PS-POLL da própria estação</p> <p>Uma estação em modo PS pode voltar ao modo ativo para receber <i>beacons</i>, para receber mensagens em broadcast e em multicast depois da recepção de <i>beacons</i>, para transmitir e para esperar a resposta a quadros PS-POLL enviados</p>

Transmissão do TIM pelos Pontos de Acesso

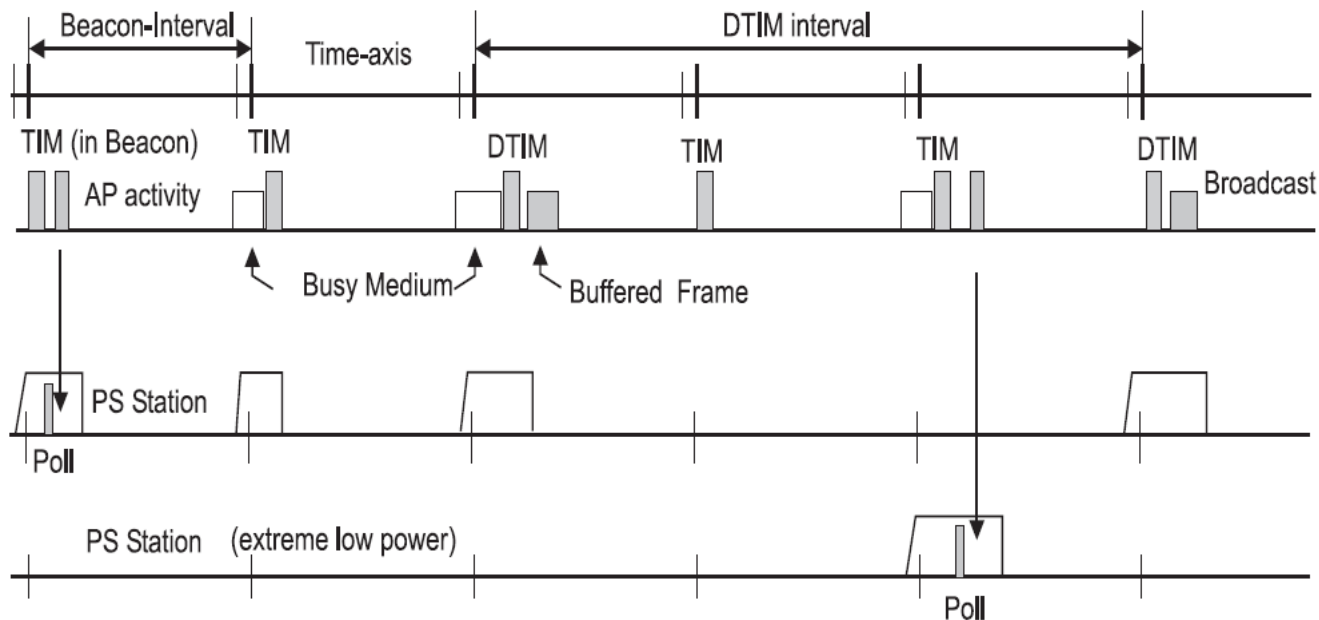
- Pontos de acesso têm que indicar as estações que possuem quadros armazenados em *buffer*
 - Informação é codificada no *partial virtual bitmap* do *beacon*
 - Estações possuem identificador atribuído no momento da associação com o ponto de acesso
 - Transmissões Unicast: **Codificam o AID (Association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



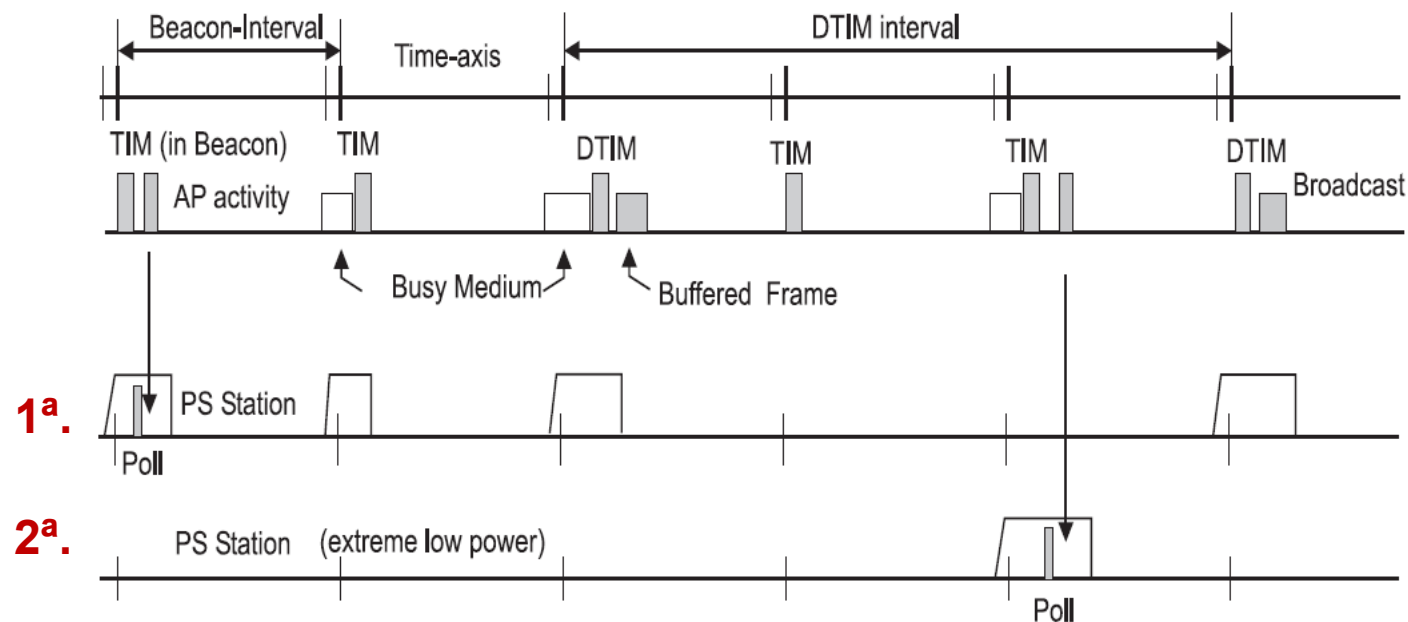
TIM enviado em cada beacon e, de tempos em tempos, o DTIM é enviado no lugar do TIM

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
 - Mantém status de todas as estações associadas
- Enviam os quadros diretamente às estações que não estiverem em modo PS
- Enviam informações sobre quadros armazenados nos *beacons*
 - 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

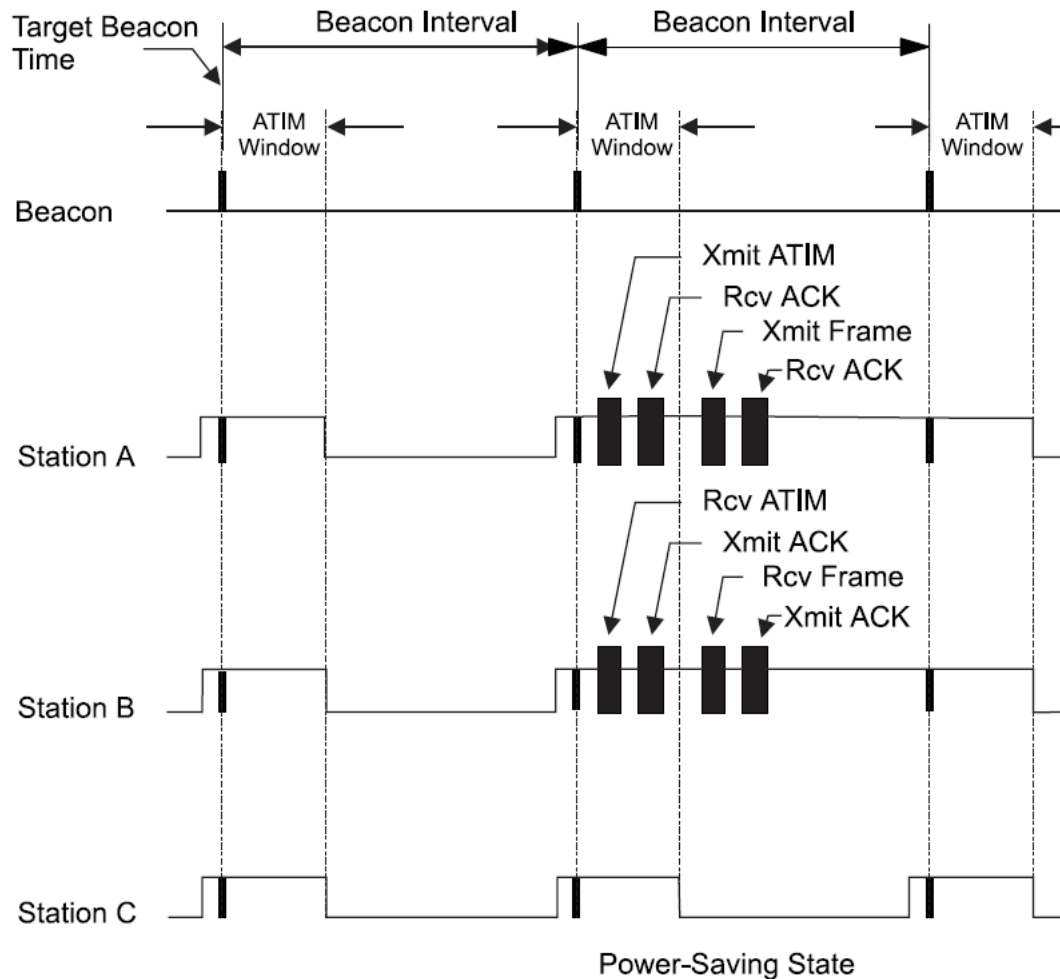
Operação das Estações

- 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

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
 - Rede ad hoc: Entre pares de estações

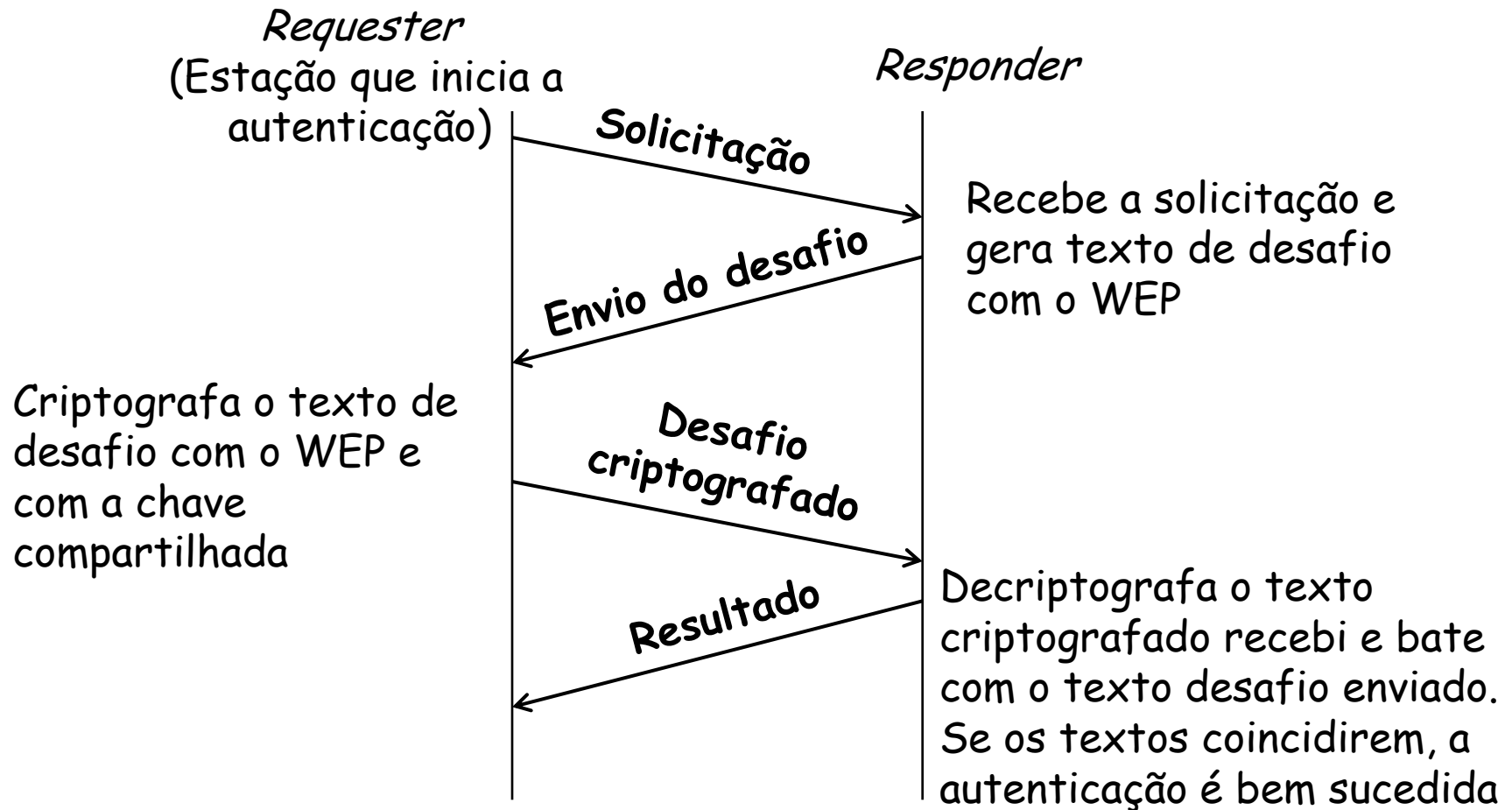
Autenticação por Sistema Aberto

- 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
 - Chave compartilhada precisa, porém, usar o mecanismo de privacidade do WEP
 - Só funciona com o 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 para geração do par Chave/IV usado na troca
 - Implementações devem evitar a repetição da Chave/IV

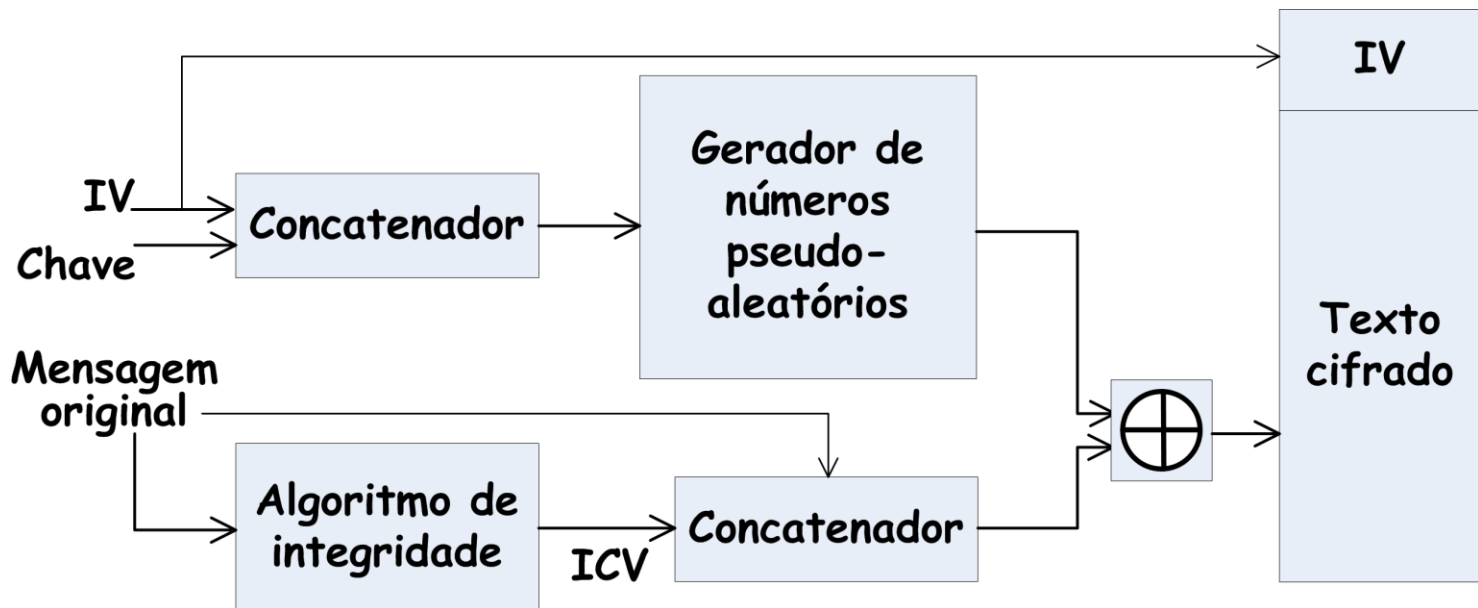
Autenticação por Chave Compartilhada



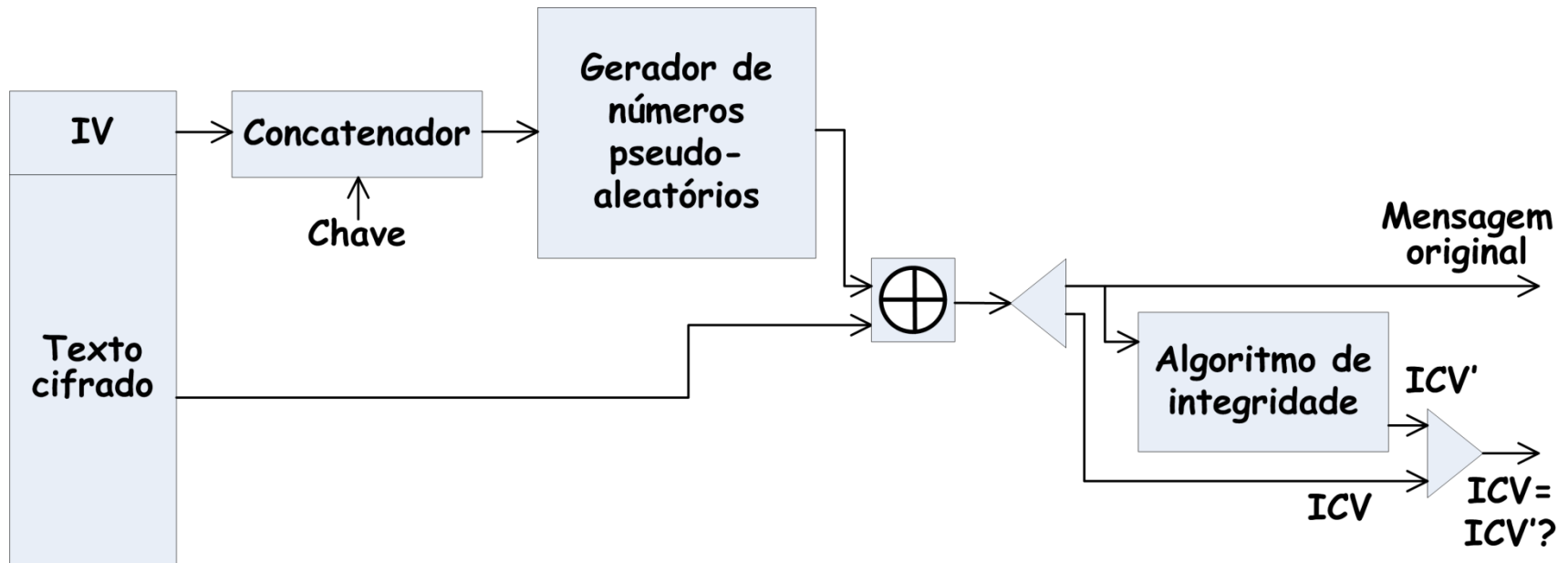
Privacidade

- 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 as mensagens originais
 - Se uma das mensagens for conhecida, pode-se obter a(s) outra(s)
- Uso de uma única chave secreta sem mecanismos de distribuição de chaves
 - Se a chave fosse modificada de tempos em tempos seria mais difícil
- Atacante pode modificar a mensagem original, recalcular o CRC e modificá-lo para a mensagem passar pela verificação de integridade

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

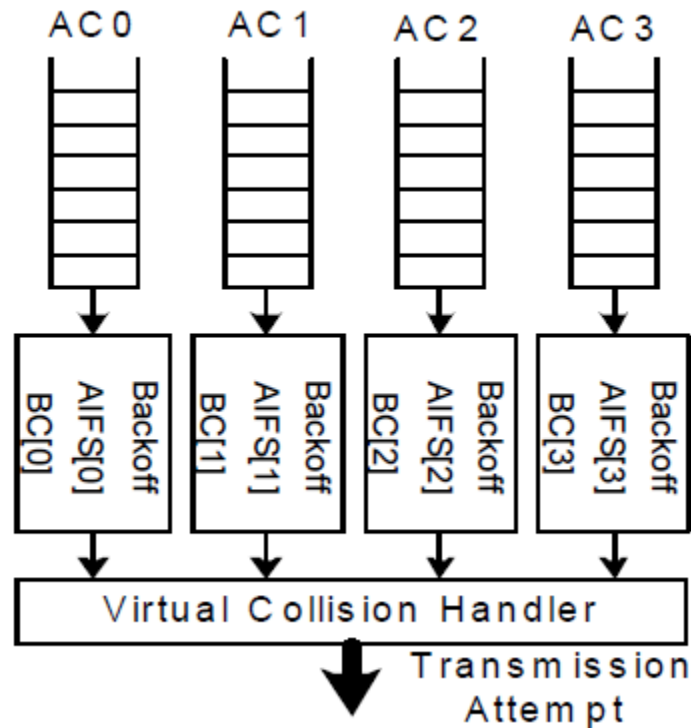
IEEE 802.11e - EDCA

- 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



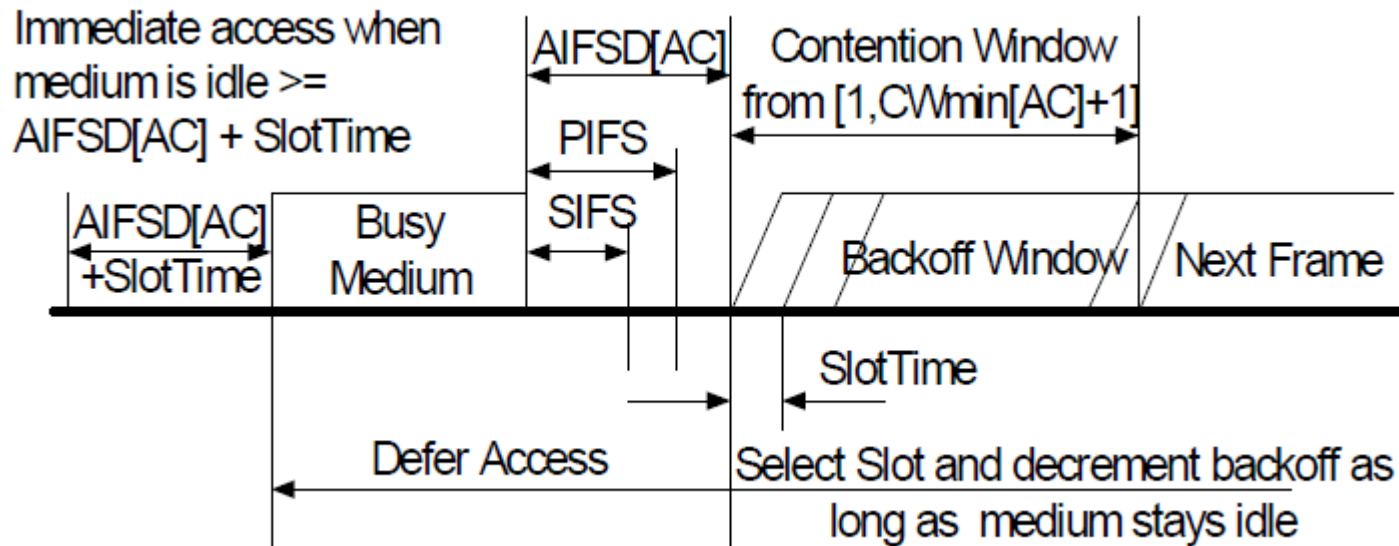
IEEE 802.11e - EDCA

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

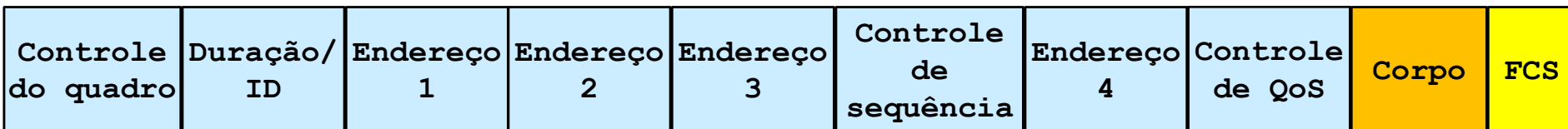


IEEE 802.11e - Quadro de Dados

- Quadro de dados modificado
- Inclusão do campo controle de QoS (2 Bytes)
 - Categoria de tráfego do quadro
 - Tipo de ACK utilizado (ACK normal ou bloco de ACKs)
 - Limite de TXOP
 - Outros

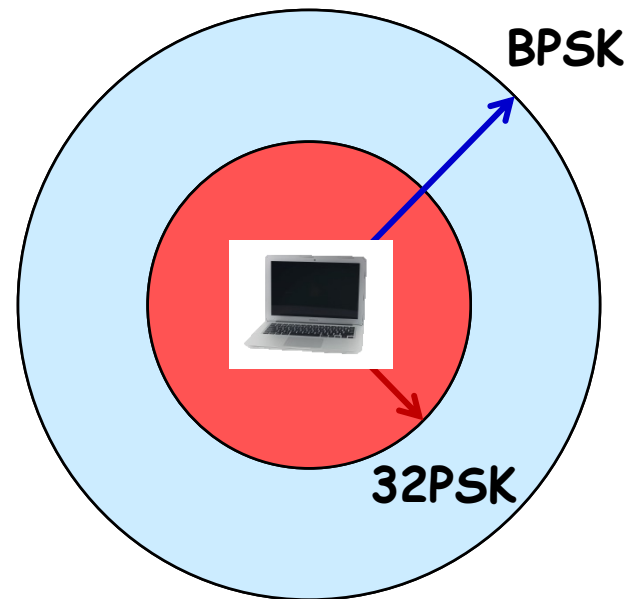
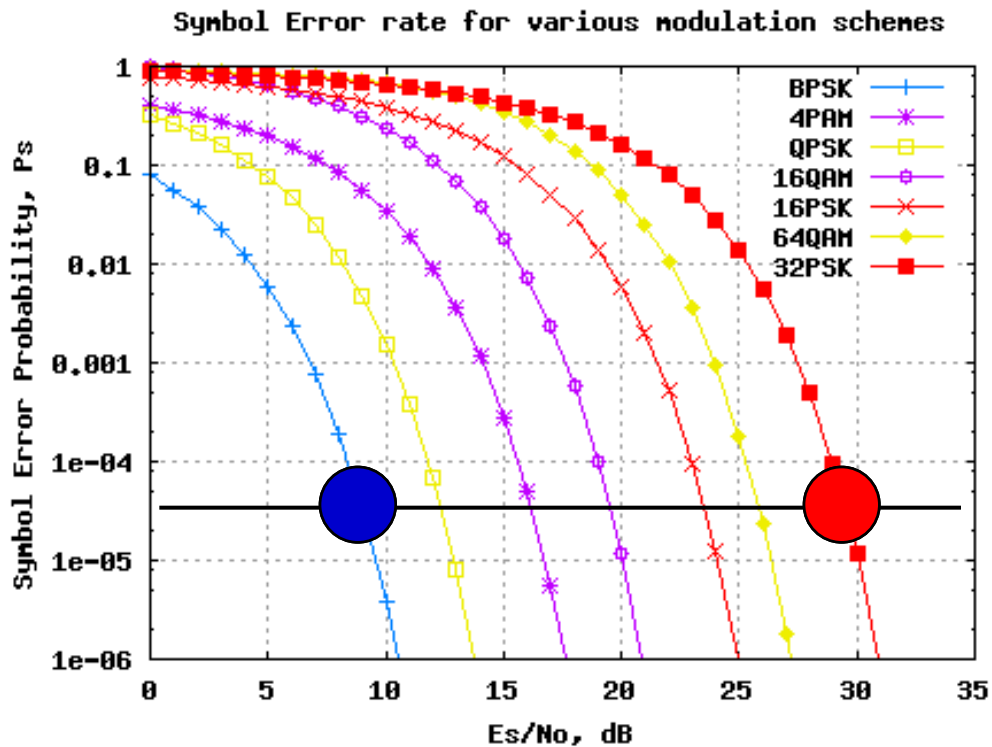
Bytes:

2 2 6 6 6 2 6 2 0-2312 4



Cabeçalho MAC

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 Mp/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 aumenta a taxa de dados para a próxima taxa disponível após N transmissões bem sucedidas
 - **Aumento da taxa de dados:**
 - Se a primeira transmissão após o aumento for bem sucedida, o limiar para aumento é reiniciado

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

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
 - 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

- **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
 - Tempo de transmissão de um quadro = tempo de transmissão do quadro até o ACK + possíveis retransmissões + 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
- **Início:**
 - **Começa transmissão na taxa mais alta possível e reduz após quatro transmissões consecutivas mal sucedidas**

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
 - **Redução do tempo de transmissão:**
 - Calcula o tempo médio de transmissão de quadros a cada 10 segundos
 - Seleciona uma taxa diferente da atual para sondar tempos médios de transmissão inferiores em outras taxas

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) Quadro RSH proposto precede o quadro de dados para finalizar a informação da tentativa de reserva no CTS
 - Taxa escolhida pela estação é incluída no RTS junto com o tamanho do pacote

Controle de Taxa

- Receiver Based Auto Rate (RBAR)
 - Estação transmissora escolhe um 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

Controle de Taxa

- Receiver Based Auto Rate (RBAR)
 - Quando o destino recebe o RTS, ela 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
 - 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 fazer uma decisão final sobre a taxa a ser usada

Controle de Taxa

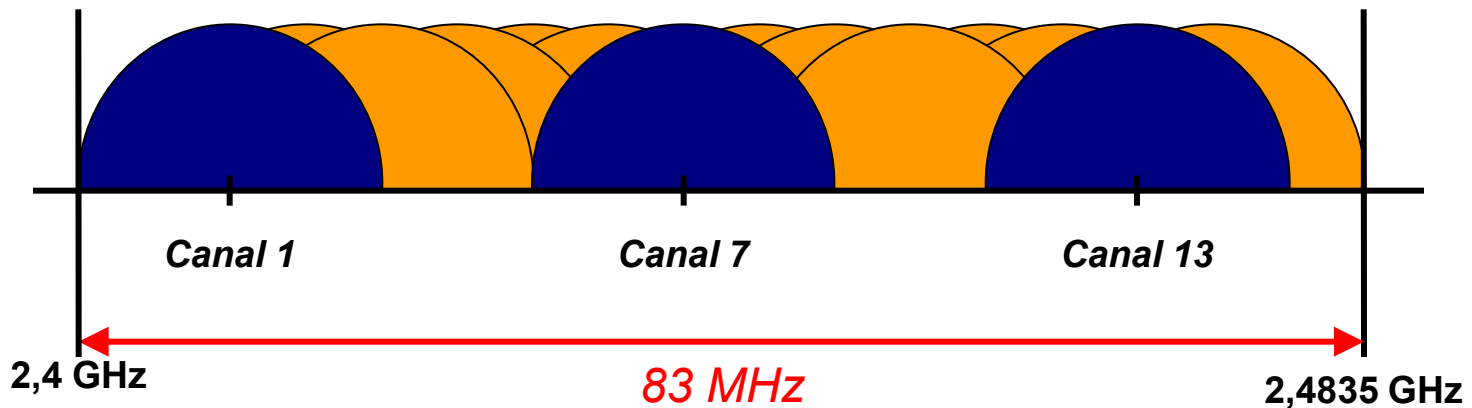
- Opportunistic Auto Rate (OAR)
 - OAR sonda a taxa através da troca de RTS/CTS
 - Parecido com o RBAR
 - Diferente do RBAR...
 - Usa transmissões oportunistas de quadros de dados

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

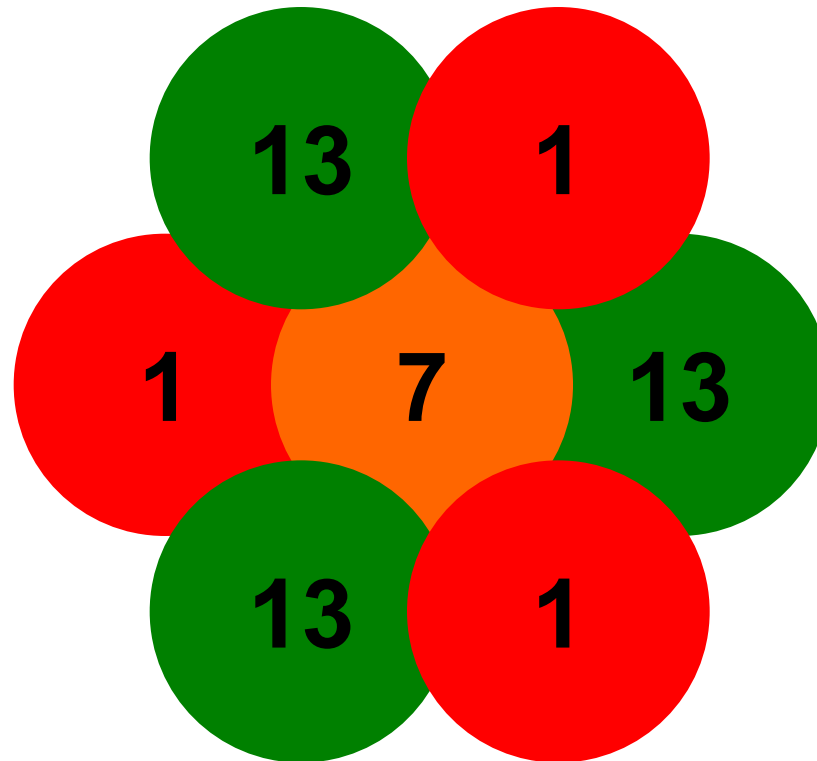
Múltiplos Canais

- 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



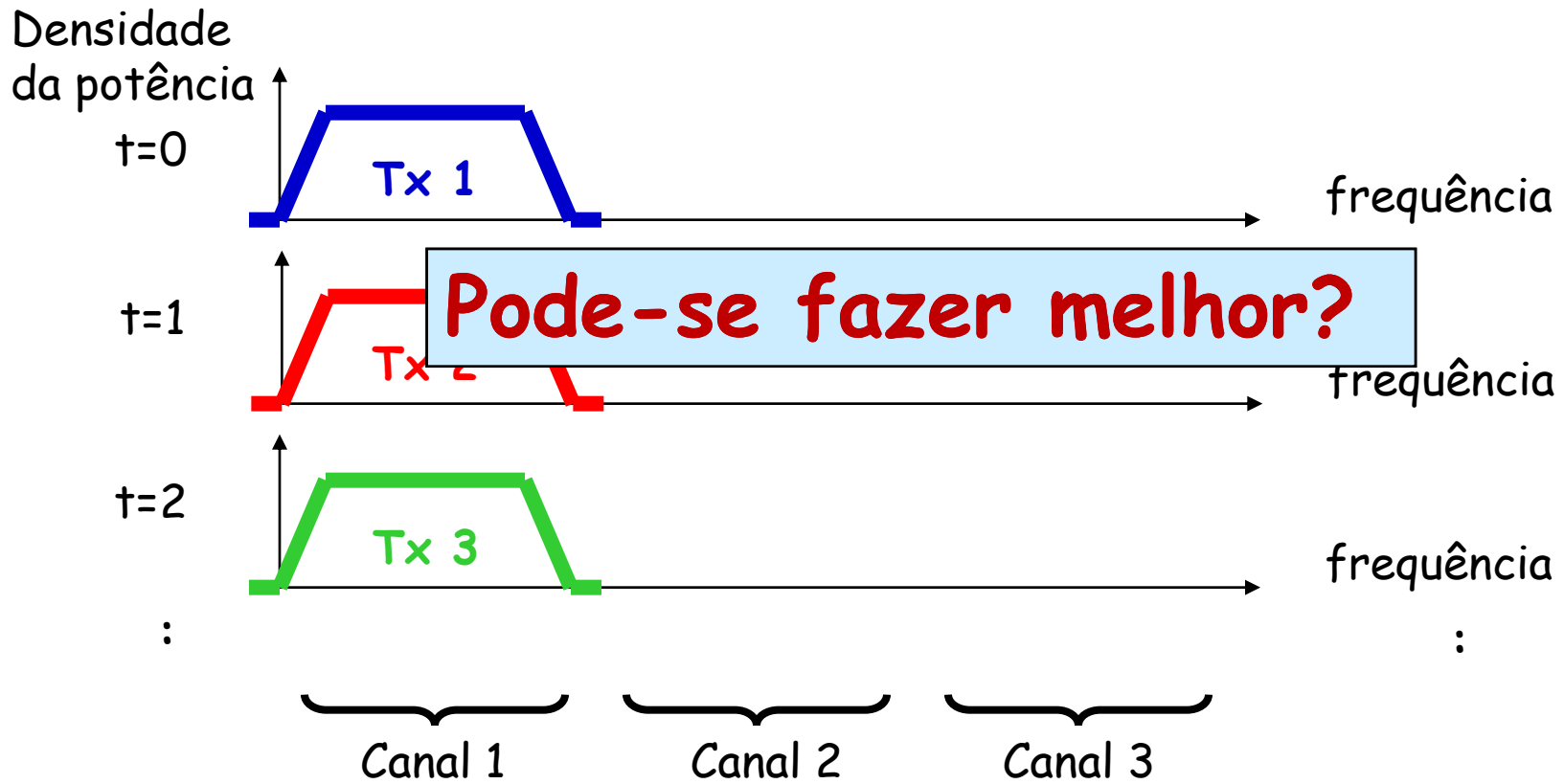
Múltiplos Canais

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



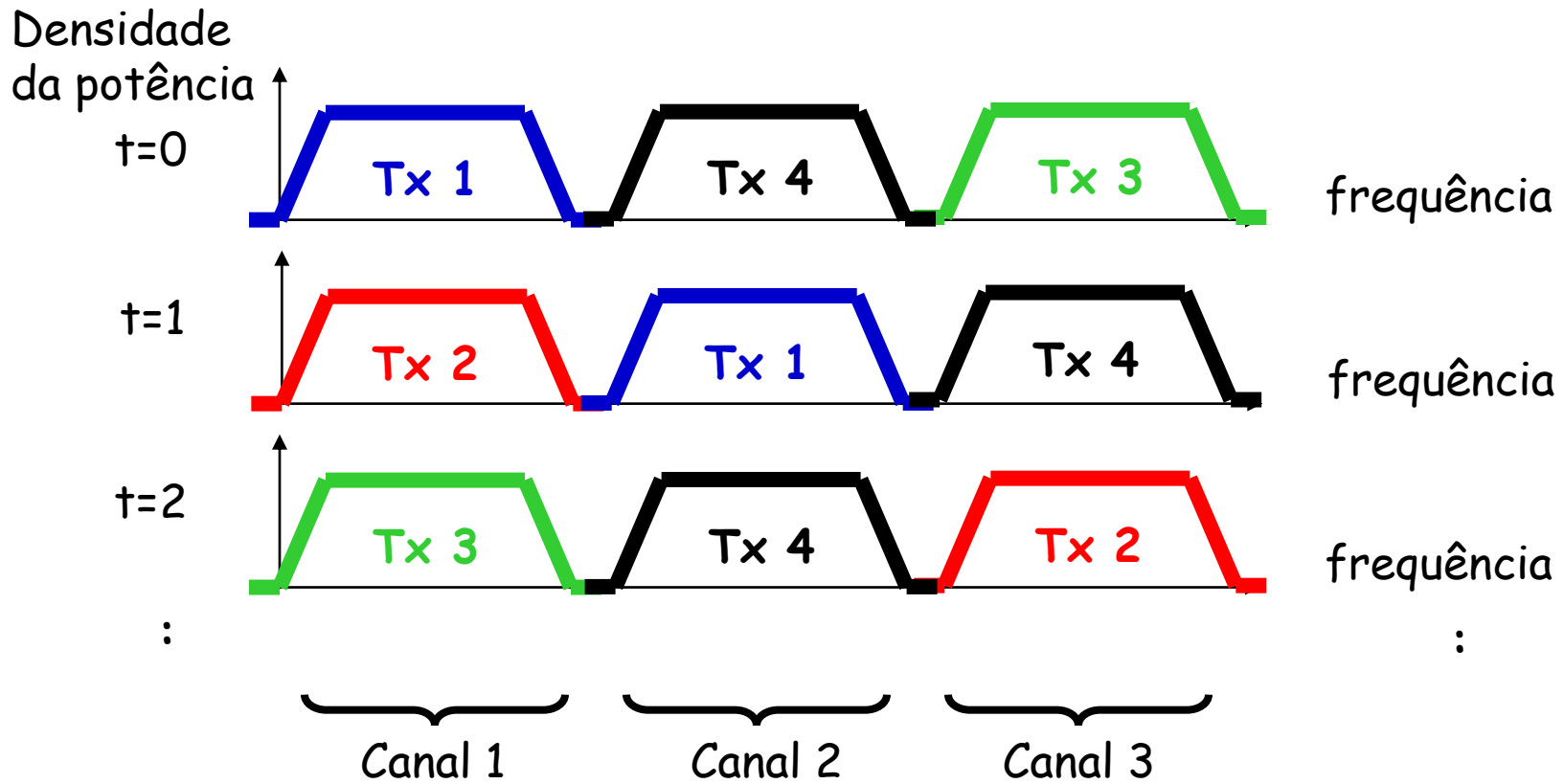
Redes Sem-fio Típicas

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 do canal 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

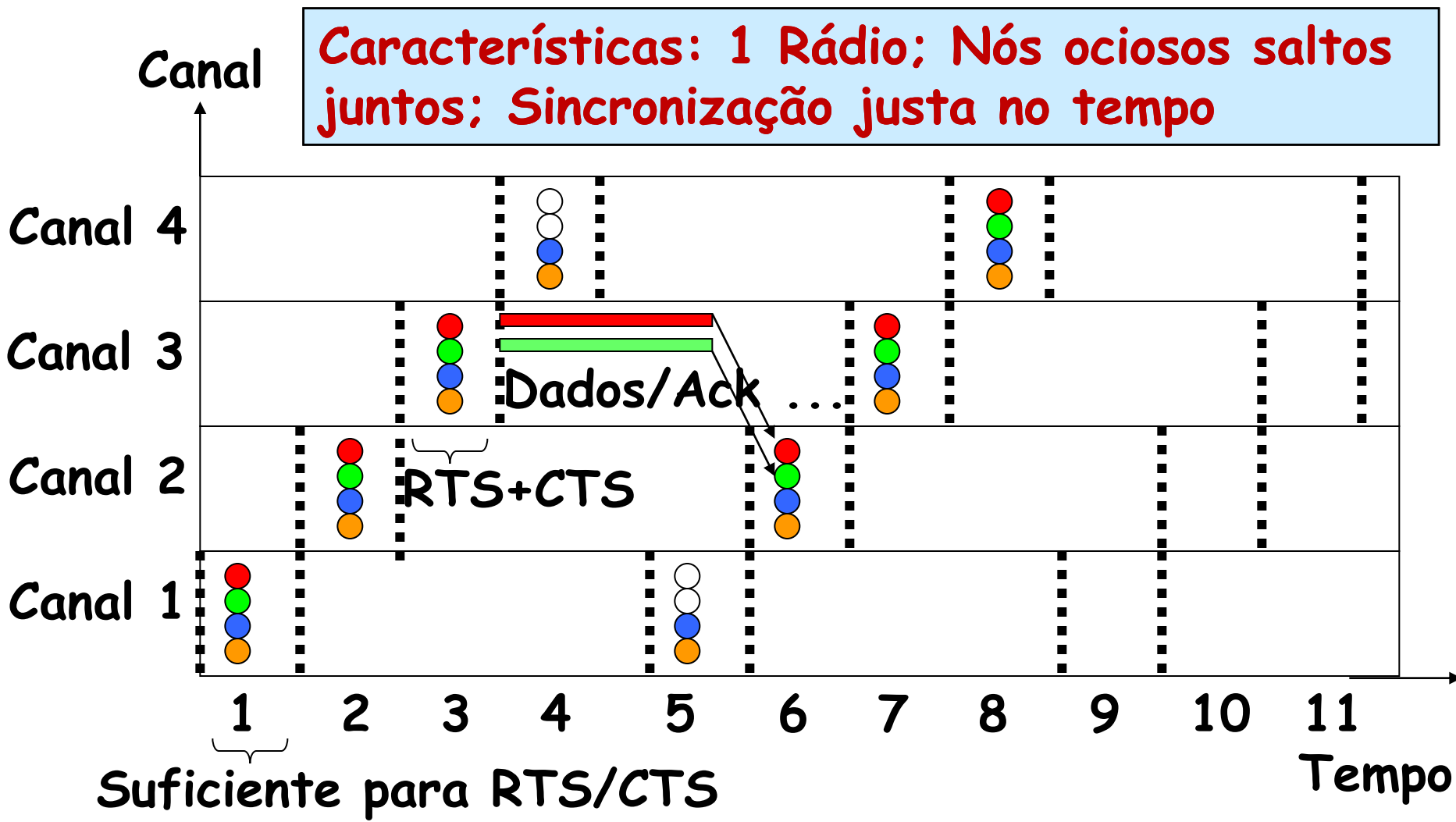


Legenda: **Nó 1** **Nó 2** **Nó 3** **Nó 4**

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

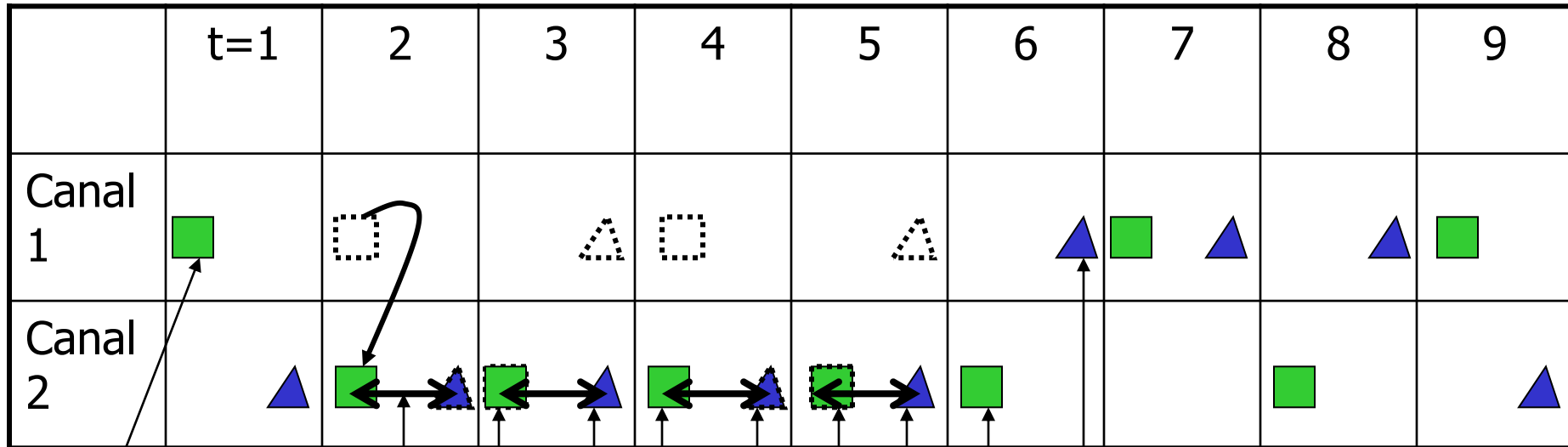
Rendezvous Paralelo

▲ ■ 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

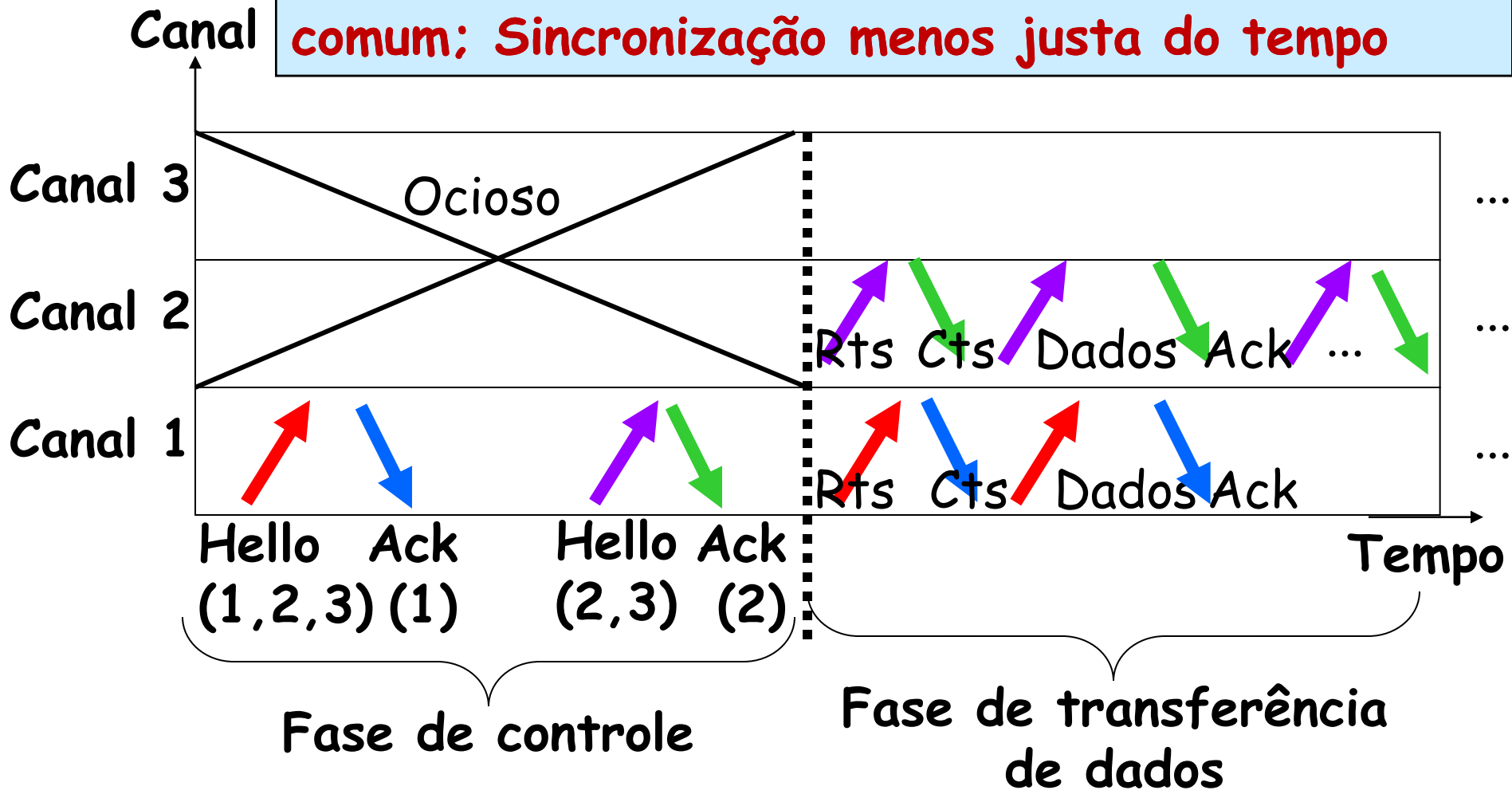
4. Reinício dos saltos

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

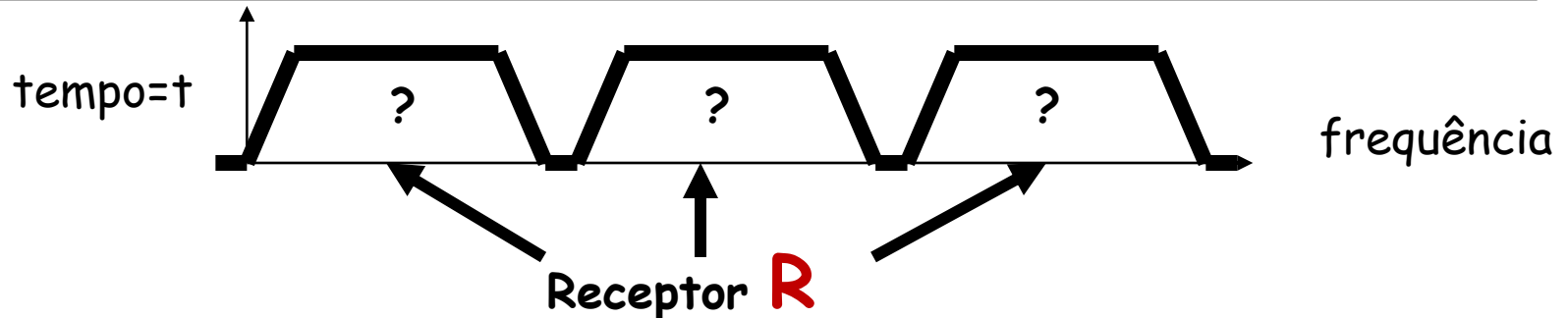
Características: 1 Rádio; Rendezvous num canal comum; Sincronização menos justa do tempo



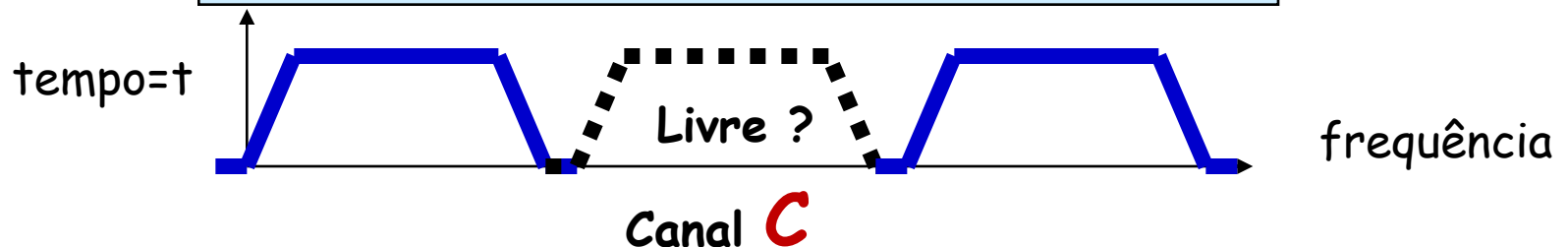
Problemas dos Múltiplos Canais em Redes Ad Hoc

- 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

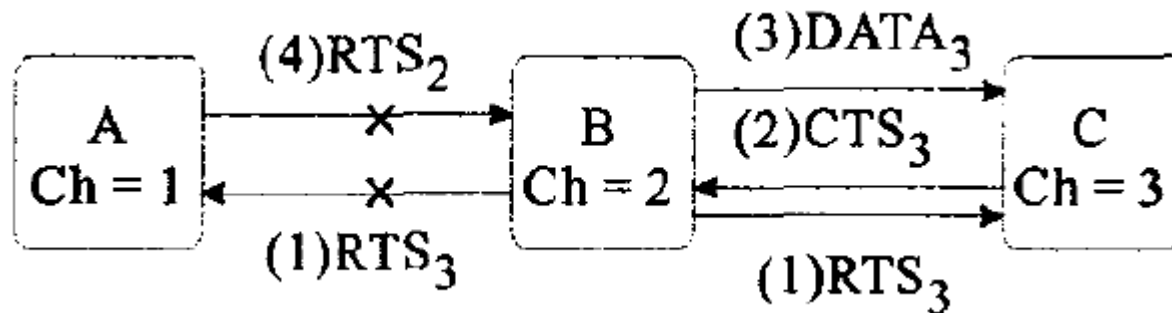
- Ex. Dynamic Channel Allocation (DCA) - Alocação Dinâmica do Canal

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

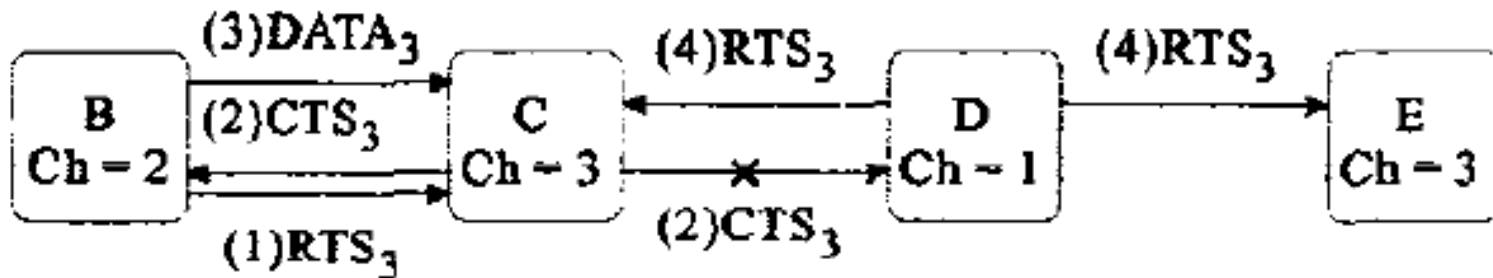
Alocação Dinâmica do Canal

- Problema do terminal **escondido** em redes multicanais
 - Estação A escuta o canal 1
 - Logo, não escuta o RTS enviado por B no canal 3
 - Estação A envia RTS no canal 2
 - Como B não escuta o canal 3, o RTS não é respondido
 - RTS não respondido gera retransmissões 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 impede que E envie dados



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].reZ-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`

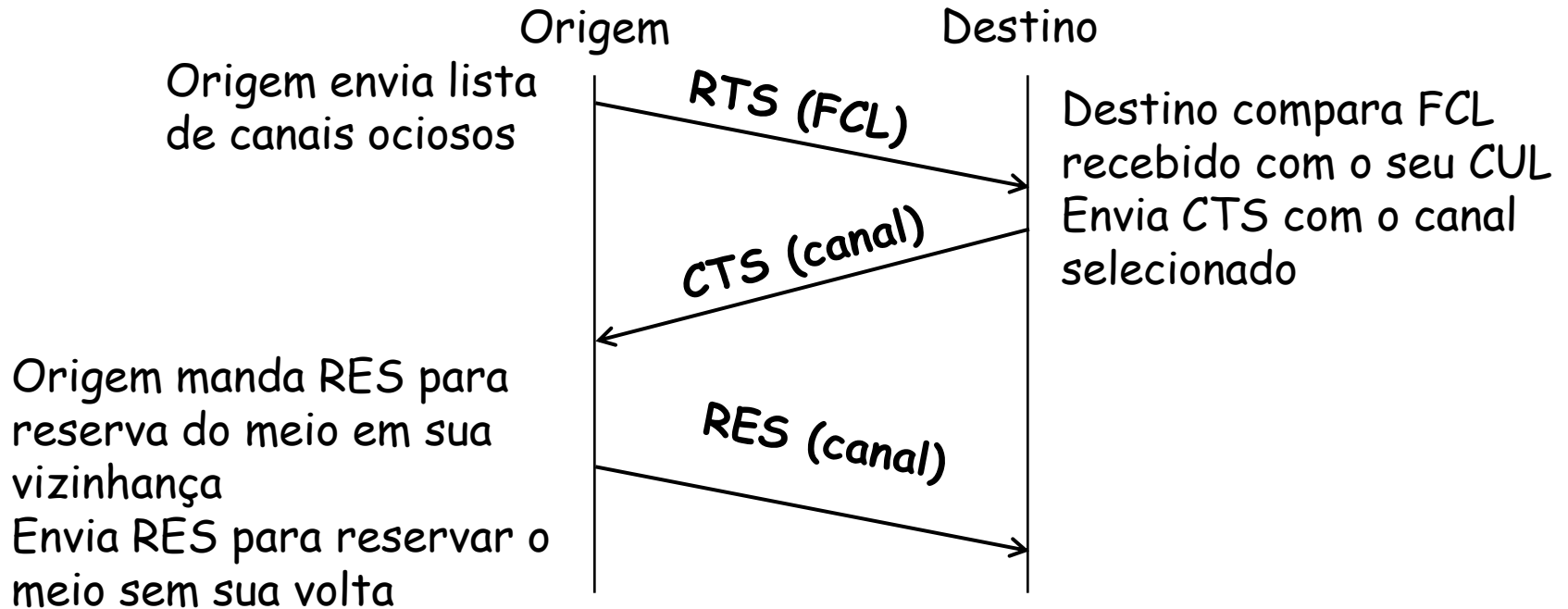
Alocação Dinâmica do Canal

- 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

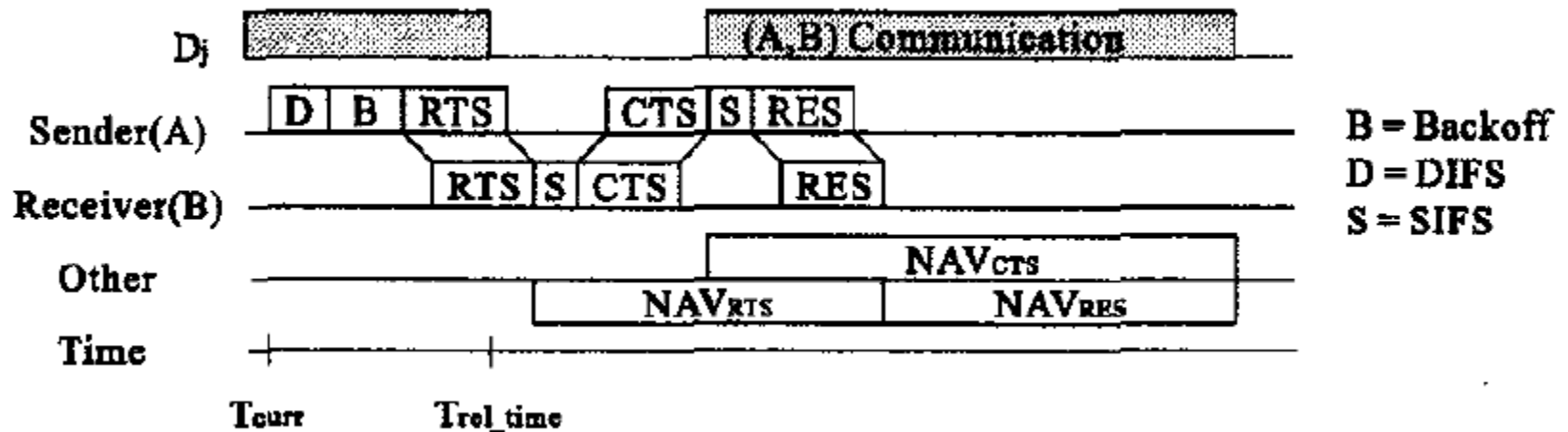
Alocação Dinâmica do Canal

- 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

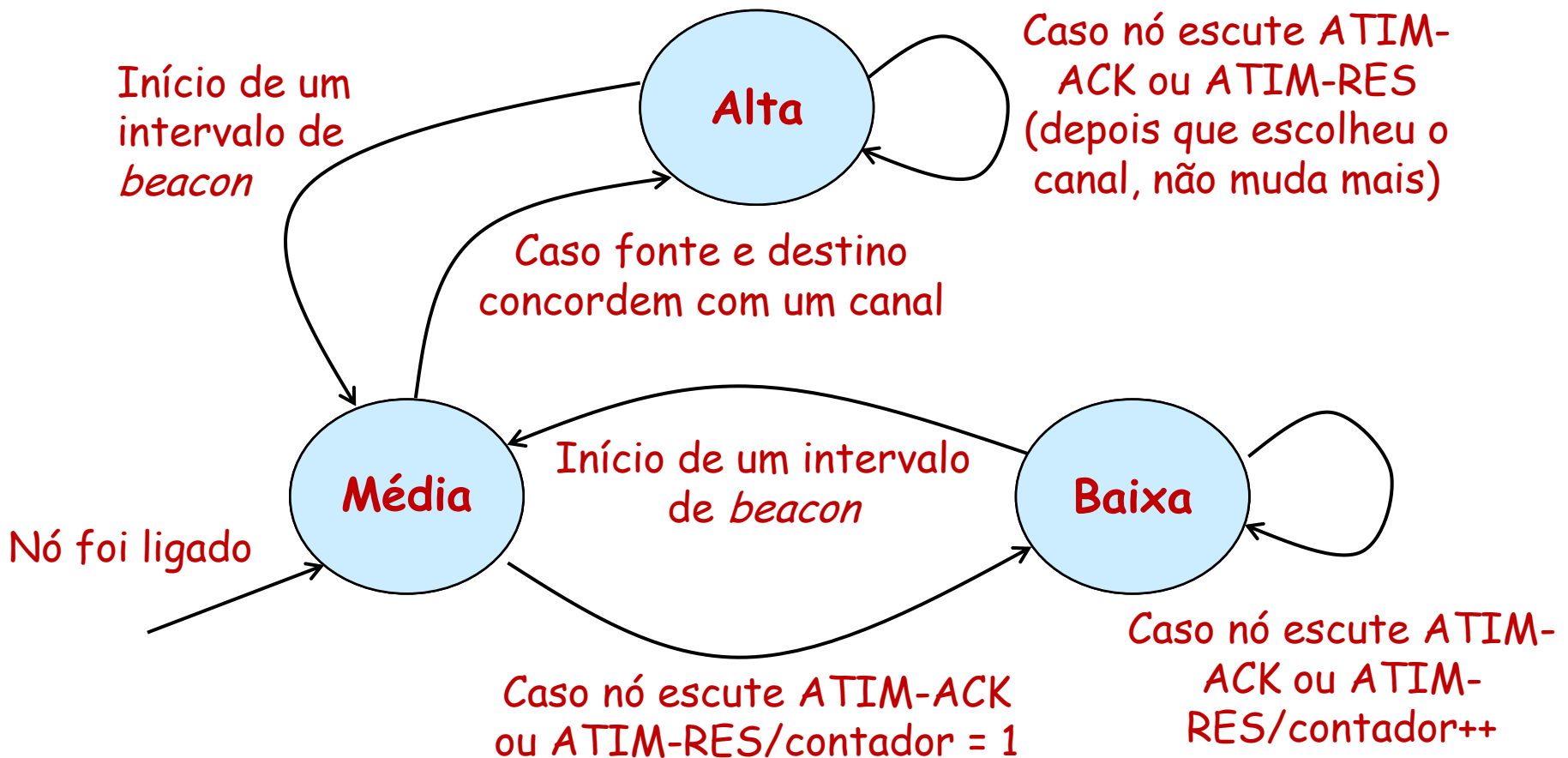
- Operação do MMAC:
 - Cada nó mantém uma estrutura de dados contendo a lista de canais preferidos (*Preferable Channel List - PCL*)
 - Indica o canal preferido do nó
 - Mantém o estado de uso dos canais na vizinhança do nó

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

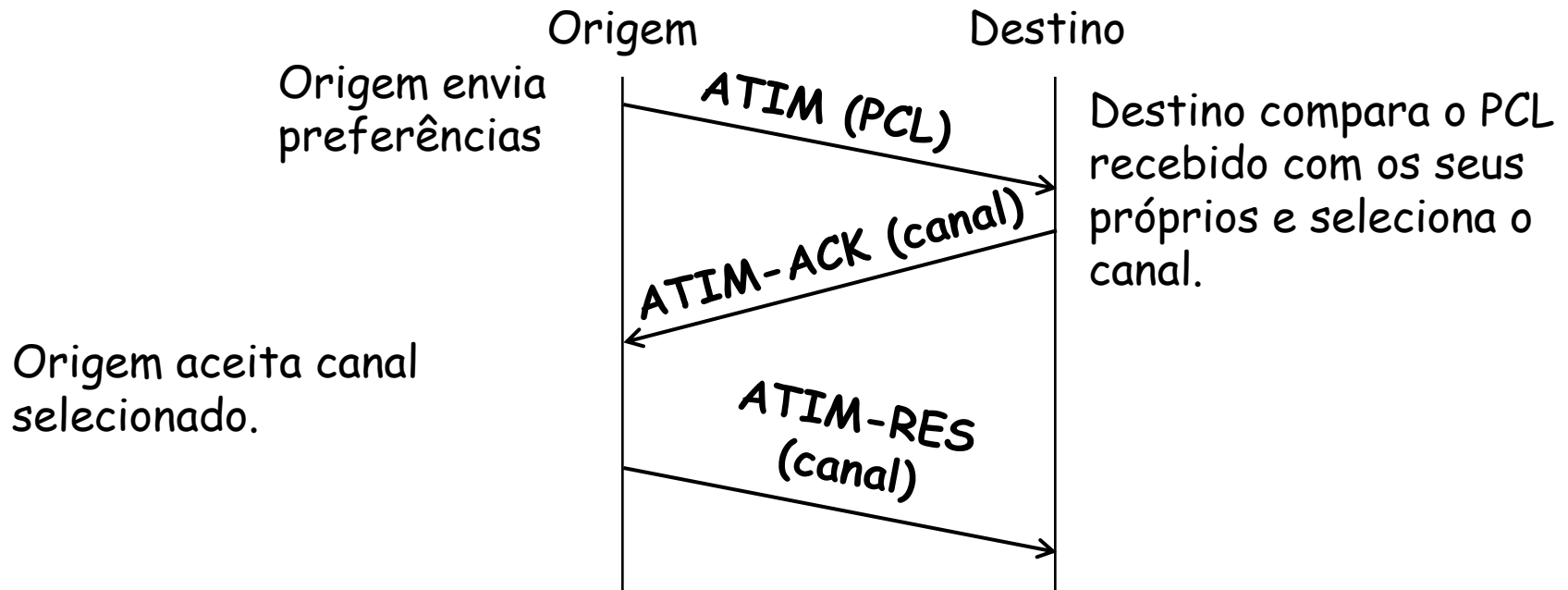
- Negociação de canais
 - Negociação é disparada caso um nó de origem tenha quadros a enviar a um nó de destino

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

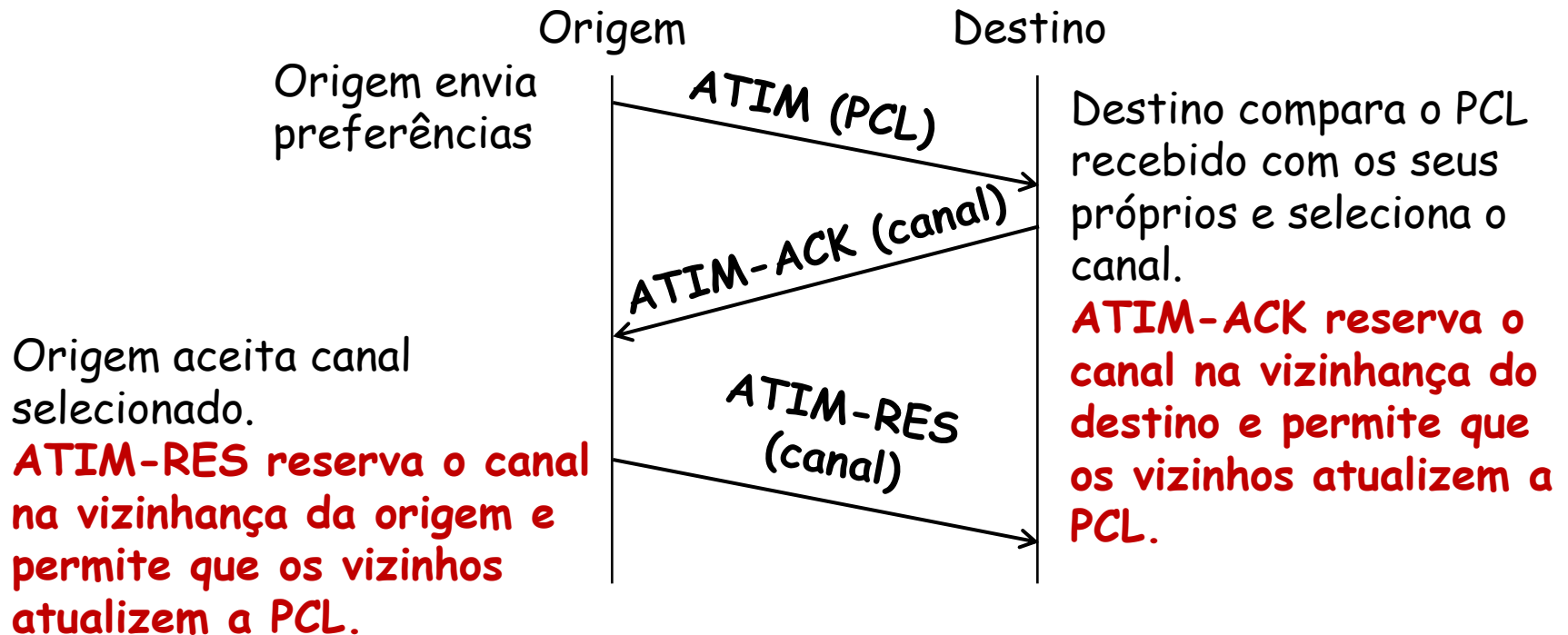
MAC Multicanal

- 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 espera 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

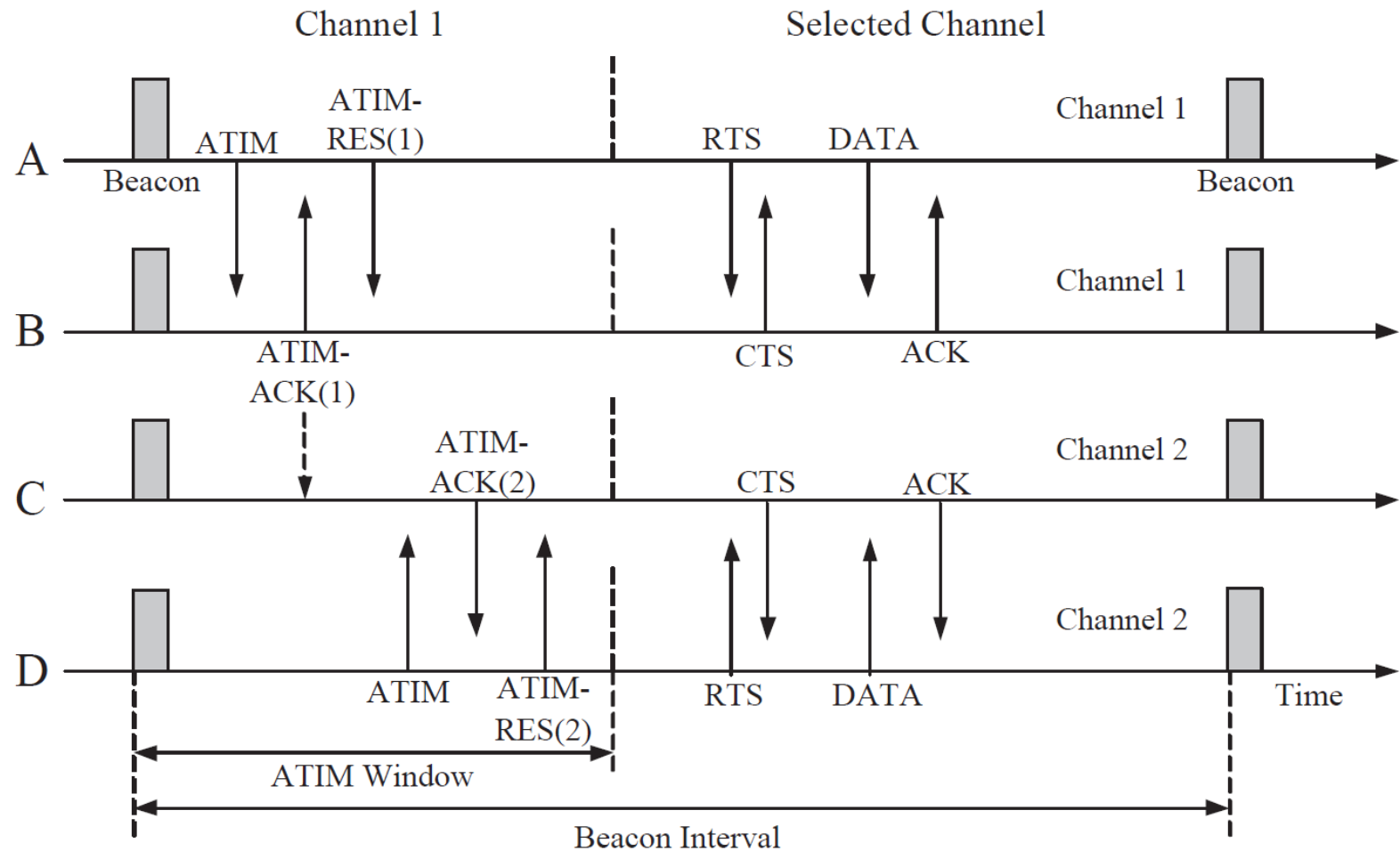
MAC Multicanal

- 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

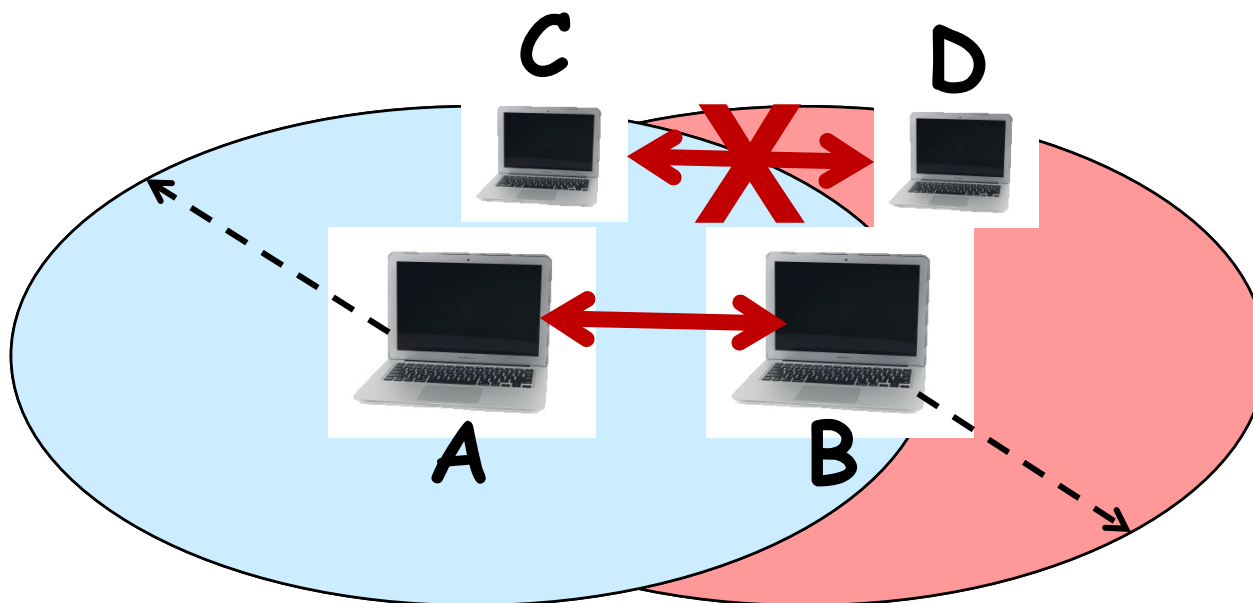
- Seleção do canal
 - Tenta balancear o uso de todos os canais disponíveis
 - Reuso de canais permite menor tempo de contenção por parte das estações
 - Usa um contador para controlar número de comunicações que ocorrem em cada canal
 - Toda vez que um ATIM-ACK e ATIM-RES é enviado, as estações vizinhas 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



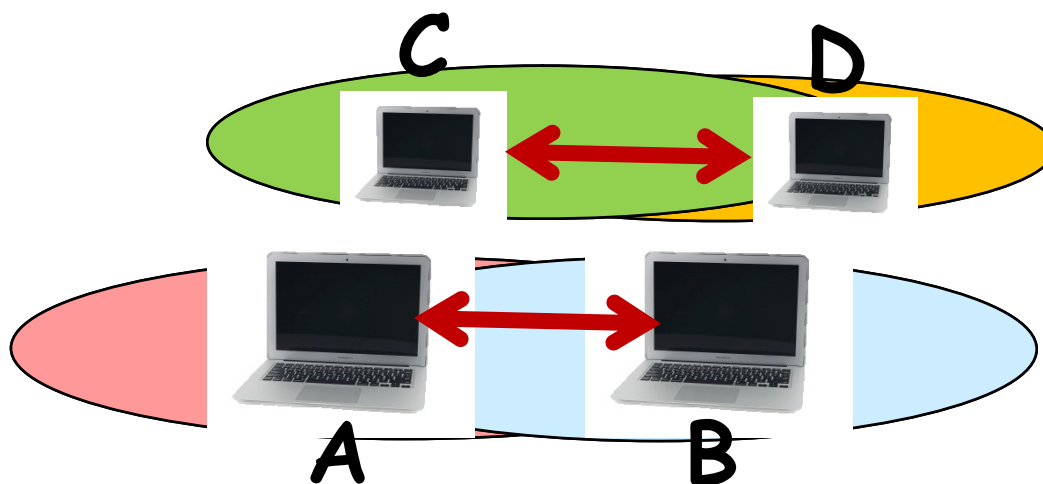
Antenas Direcionais

- 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

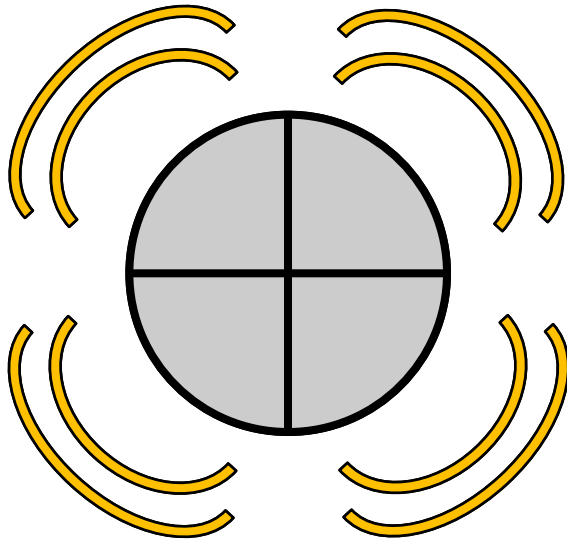
- Protocolos podem explorar as antenas direcionais durante:
 - Reserva do meio: RTS/CTS
 - Transmissão dos dados

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

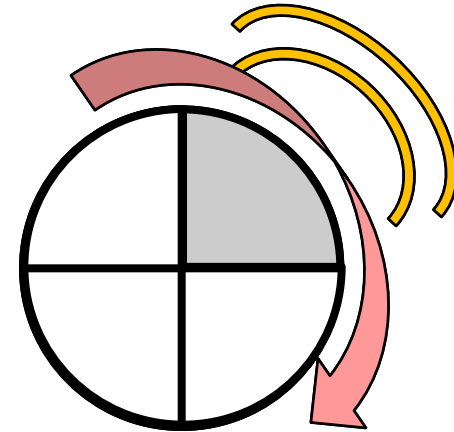
Antenas Direcionais

- Duas formas de operação:

Estáticas

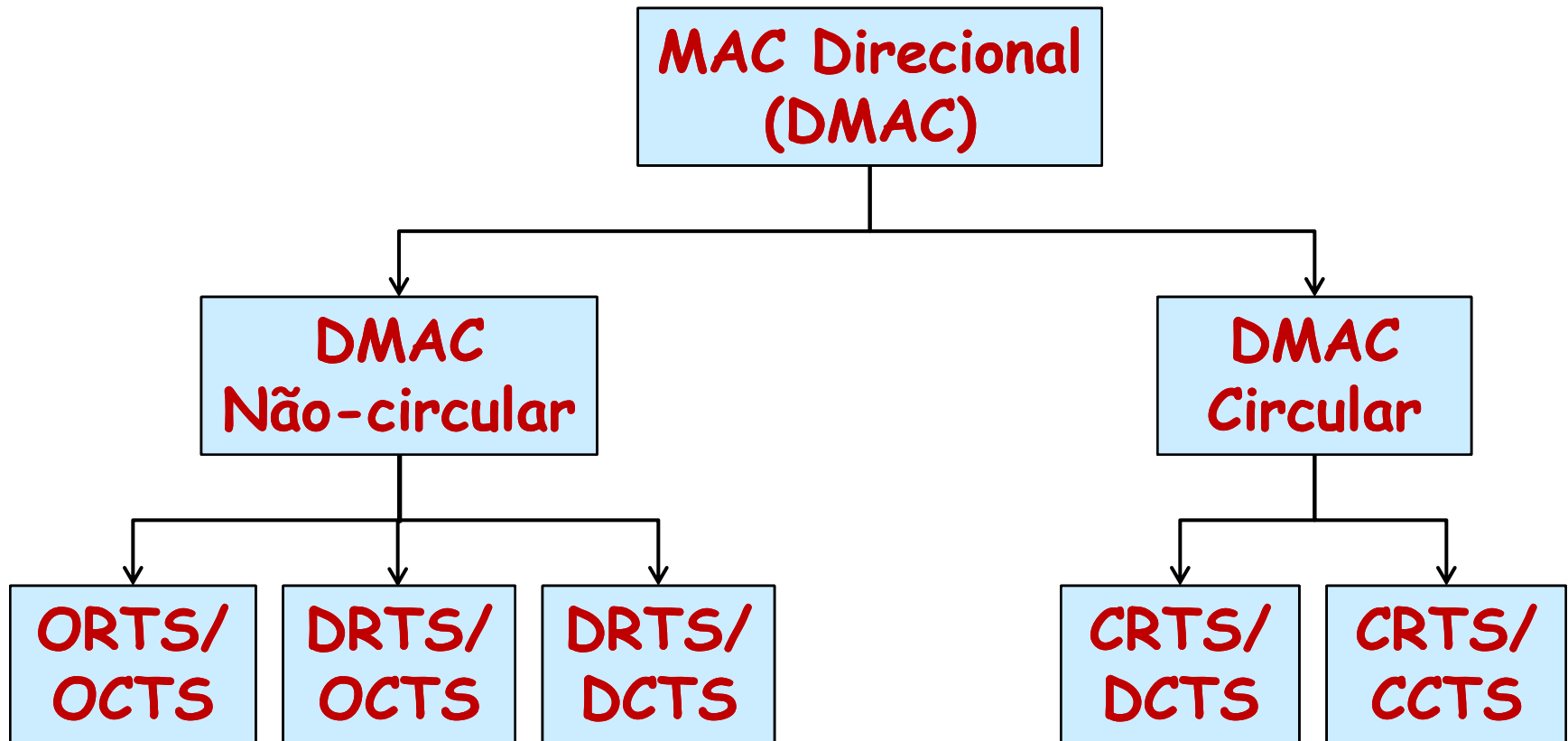


Varredura e alinhamento



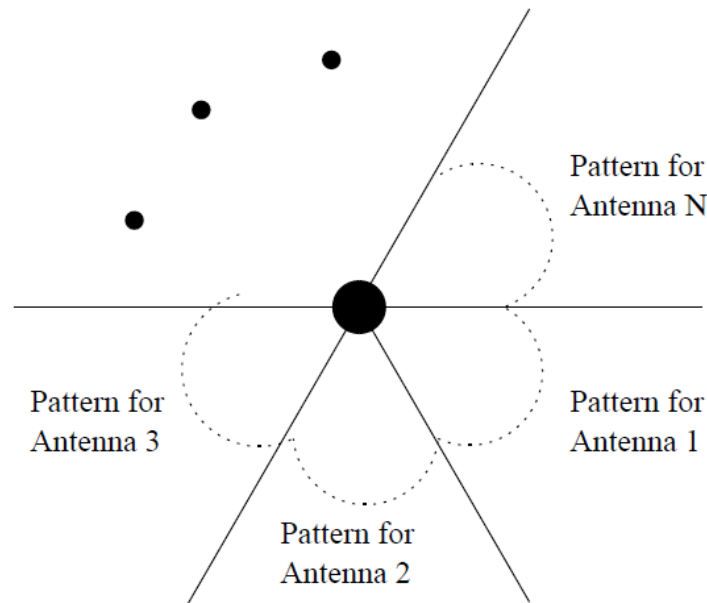
Antenas Direcionais

- 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

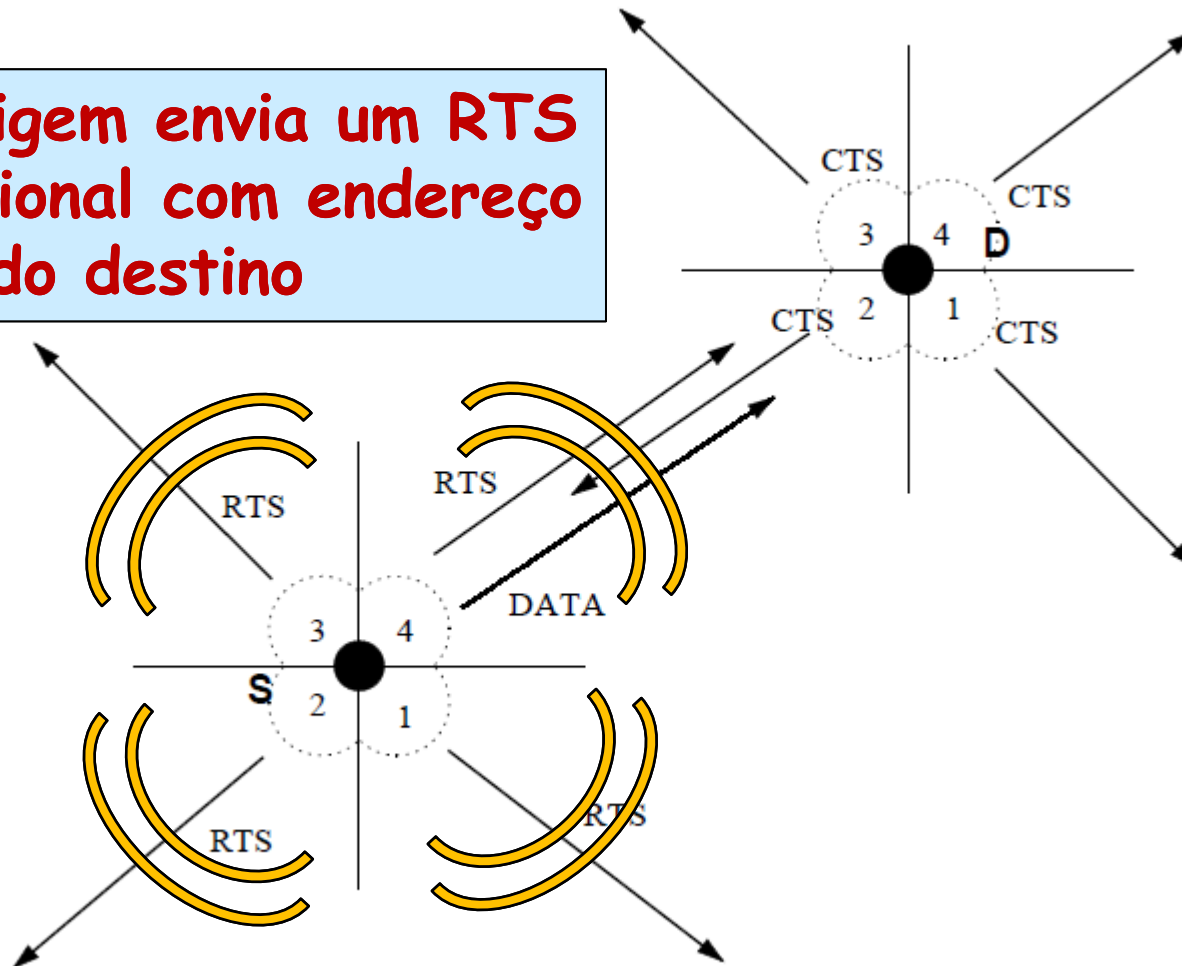


DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

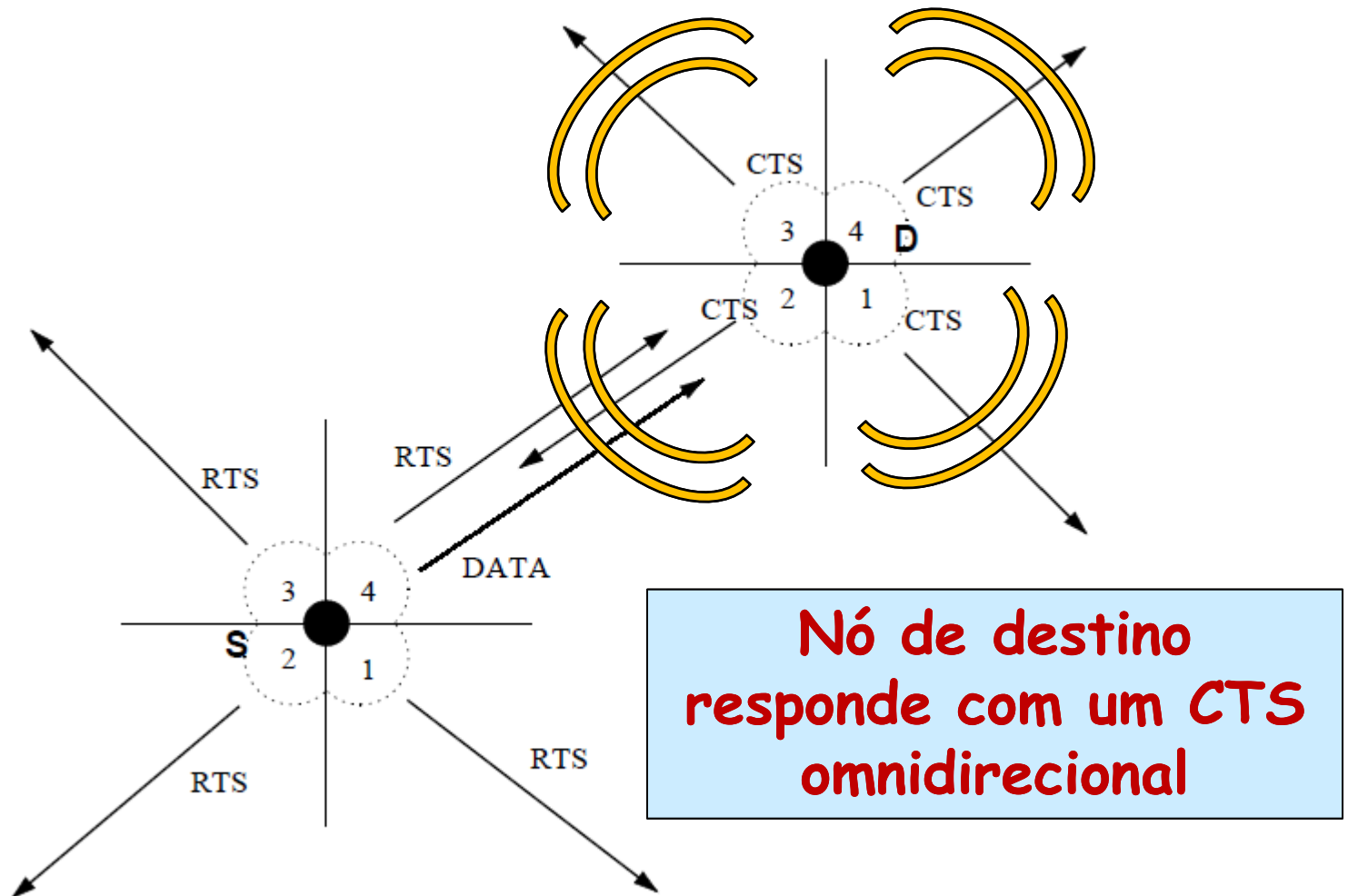
- Protocolo pode comutar antenas entre modo ativo e passivo
 - Transmissão/recepção usa apenas antenas ativas
- Transmissões com todas as antenas ativas
 - Sinal é transmitido em todas as direções
- Recepção em todas as antenas
 - Antena recebendo sinal com maior potência é usada
 - Antena direcionada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

DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

Nó de origem envia um RTS
omnidirecional com endereço
do destino

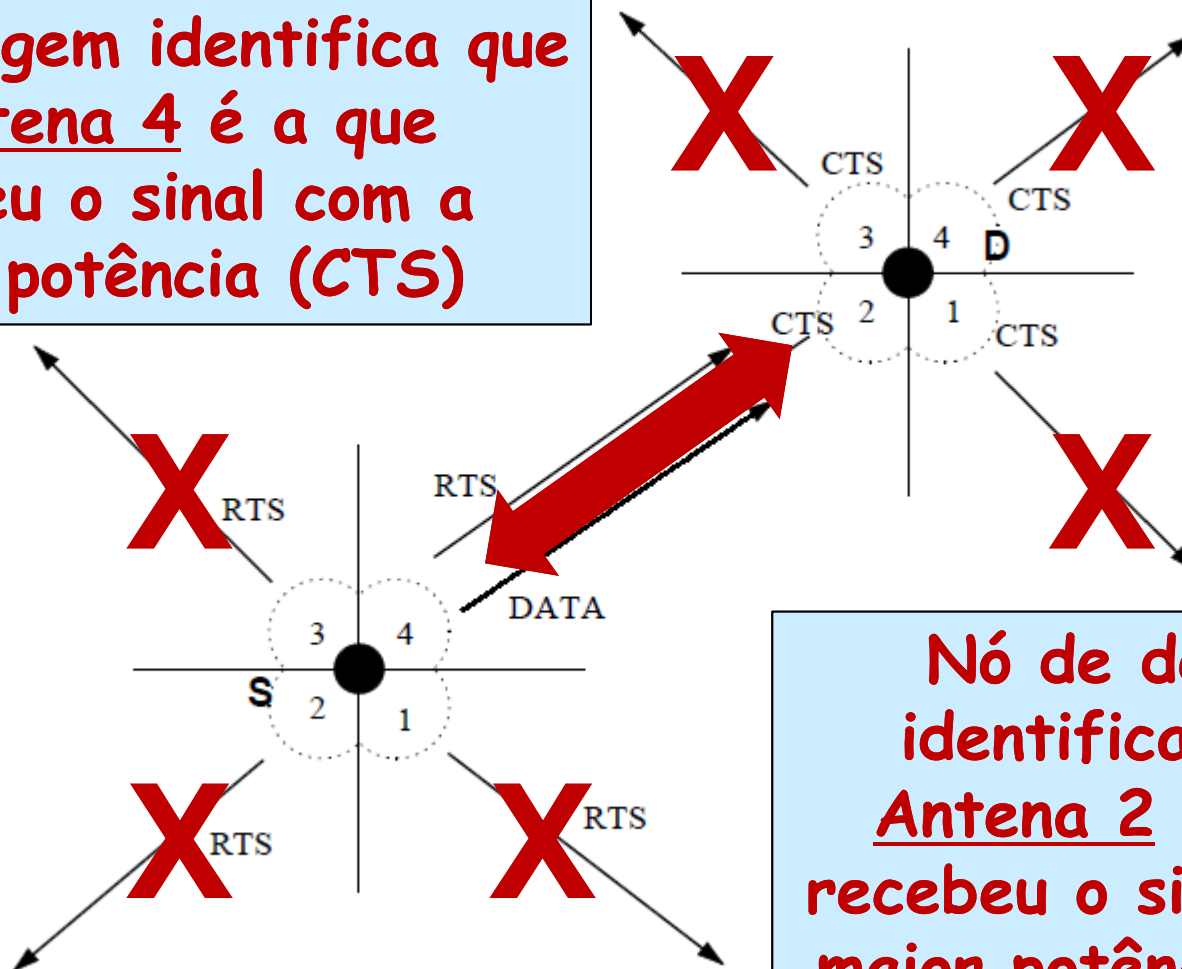


DMAC Não-circular: ORTS/OCTS



DMAC Não-circular: ORTS/OCTS

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

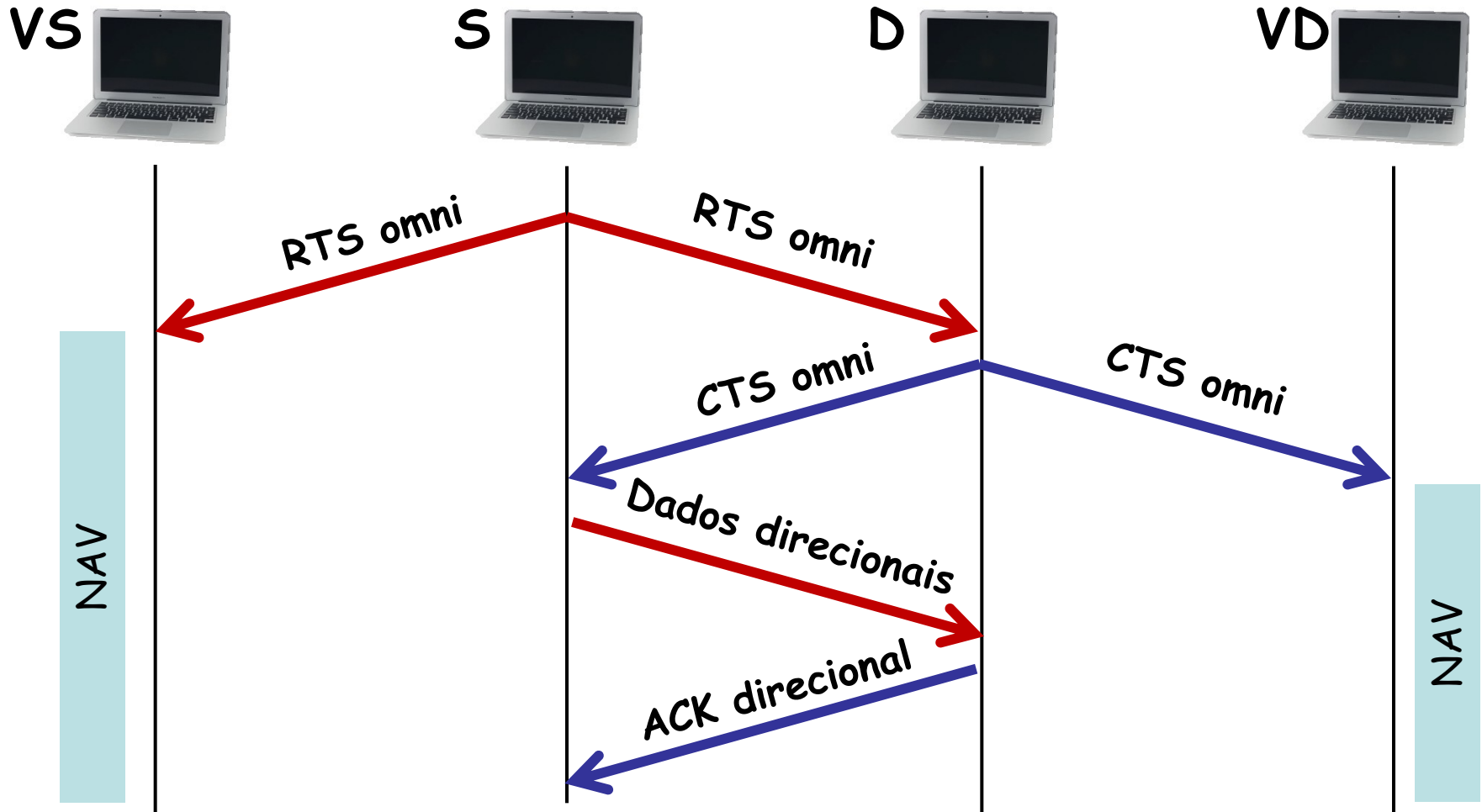


Nó de destino identifica que a Antena 2 é a que recebeu o sinal com a maior potência (RTS)

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...

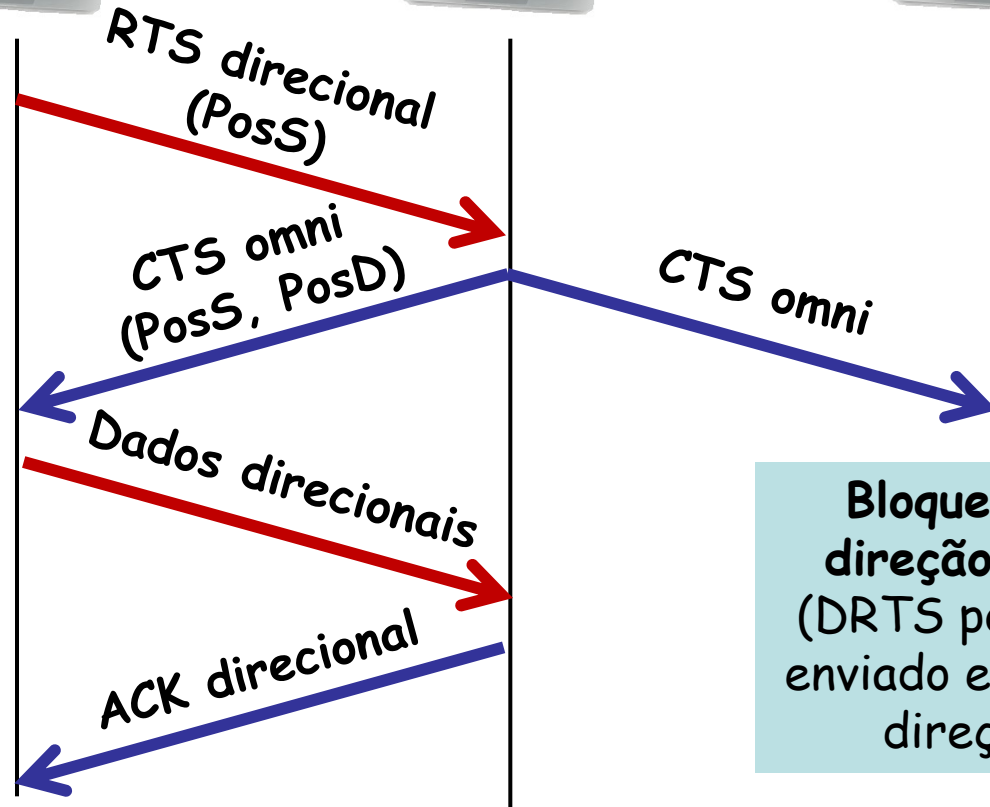
DMAC Não-circular: DRTS/OCTS

- **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



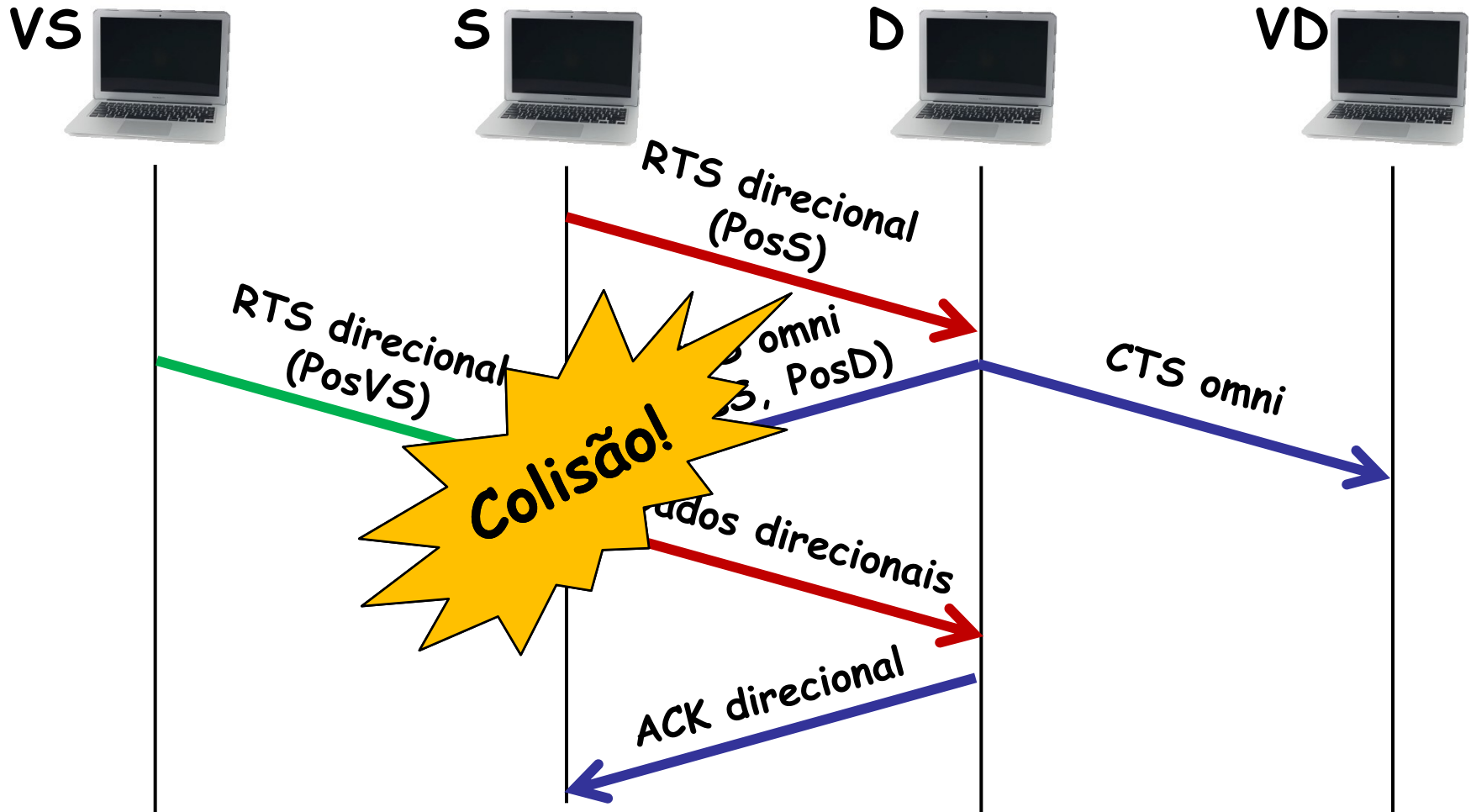
Pode enviar DRTS para qualquer outra estação pois não possui nenhuma antena bloqueada

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

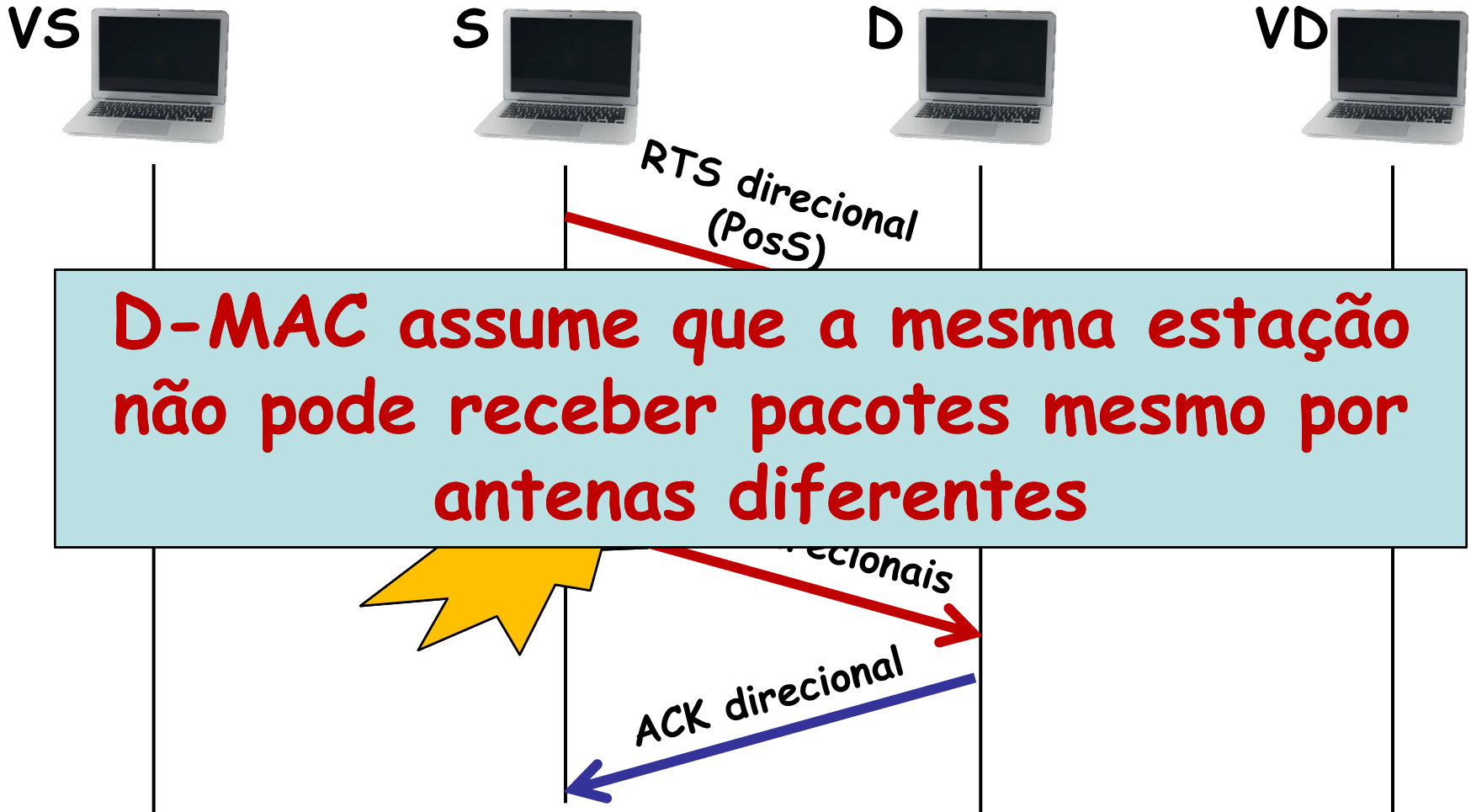
DMAC Não-circular: DRTS/OCTS



DMAC Não-circular: DRTS/OCTS



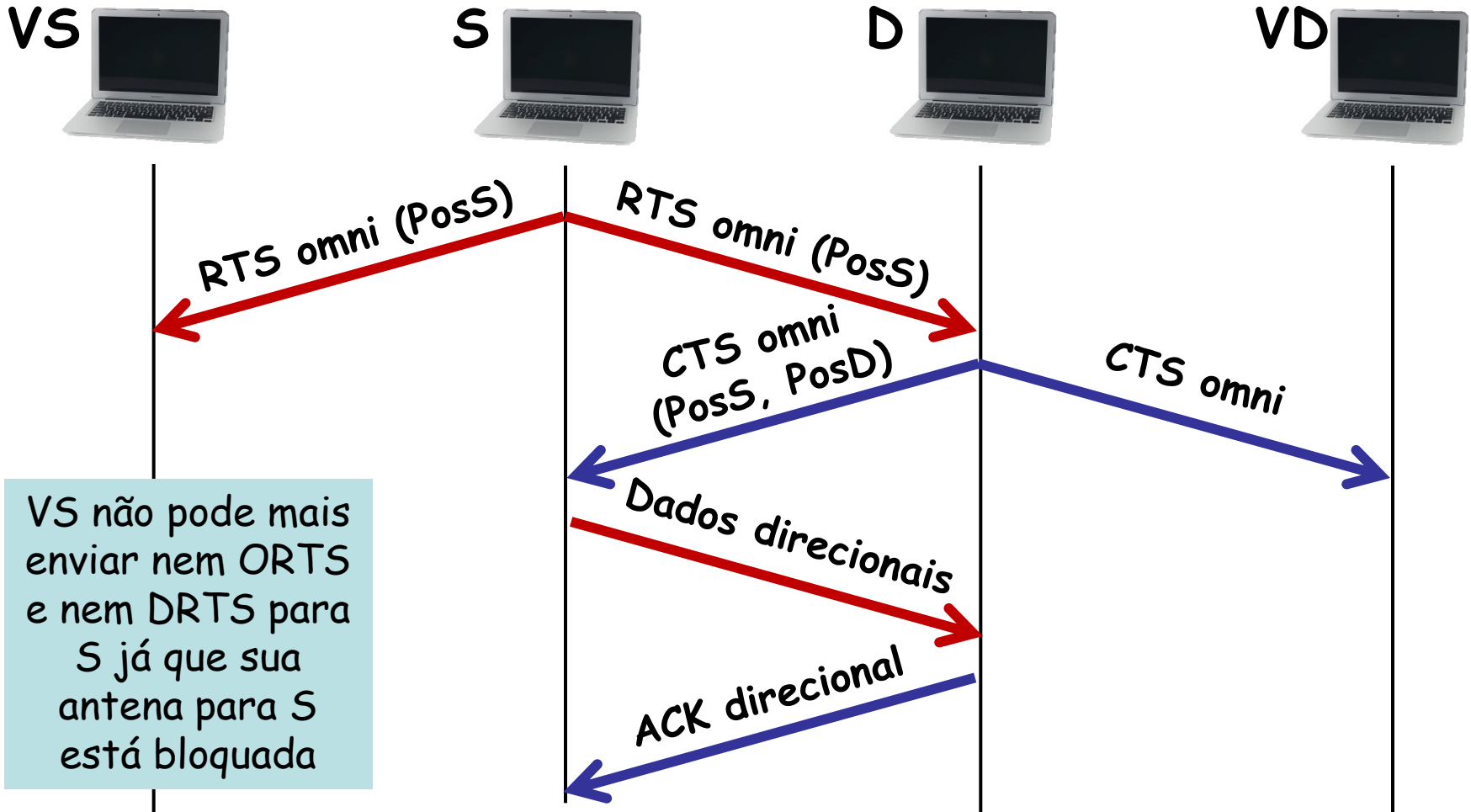
DMAC Não-circular: DRTS/OCTS



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

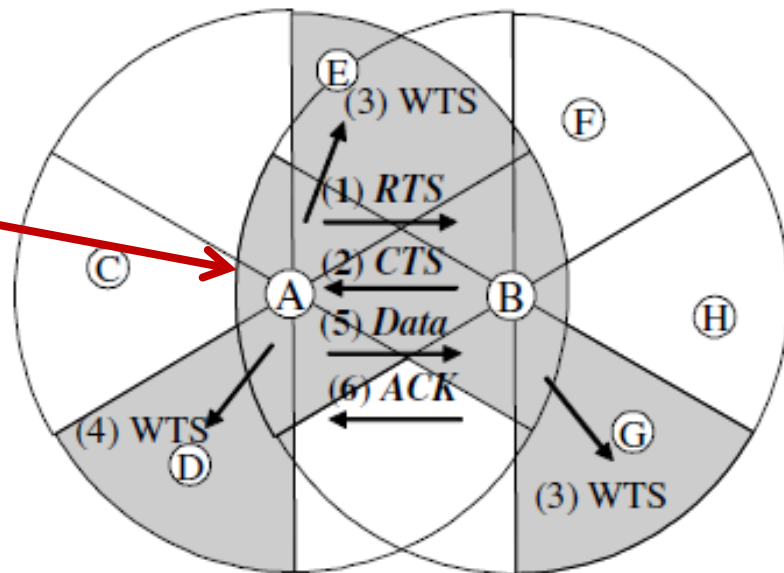
- Estações com M antenas direcionais não-sobrepostas
- Cada antena pode operar em dois modos:
 - **Omnidirecional**
 - Estações recebem sinais em todas as direções
 - Estações ociosas esperam sinais em modo omni
 - **Direcional**
 - Estações mudam para modo direcional caso um sinal seja recebido
 - Estações 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}

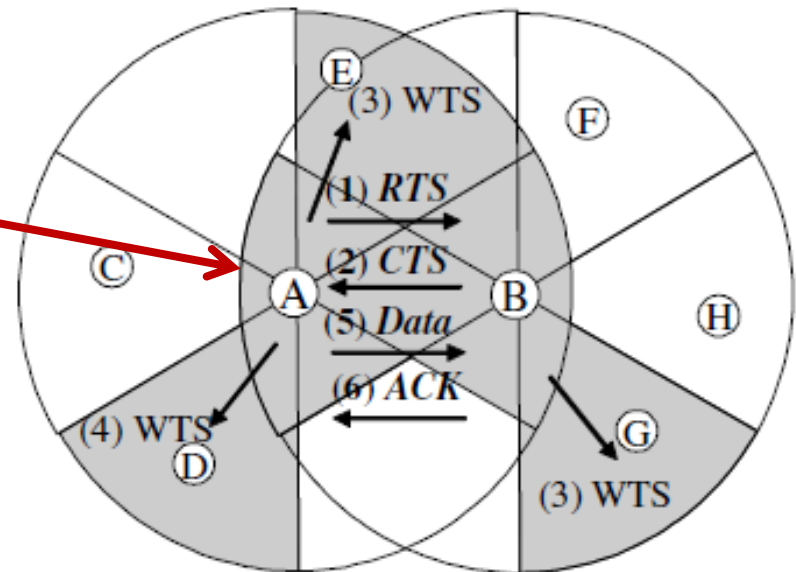


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- 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}

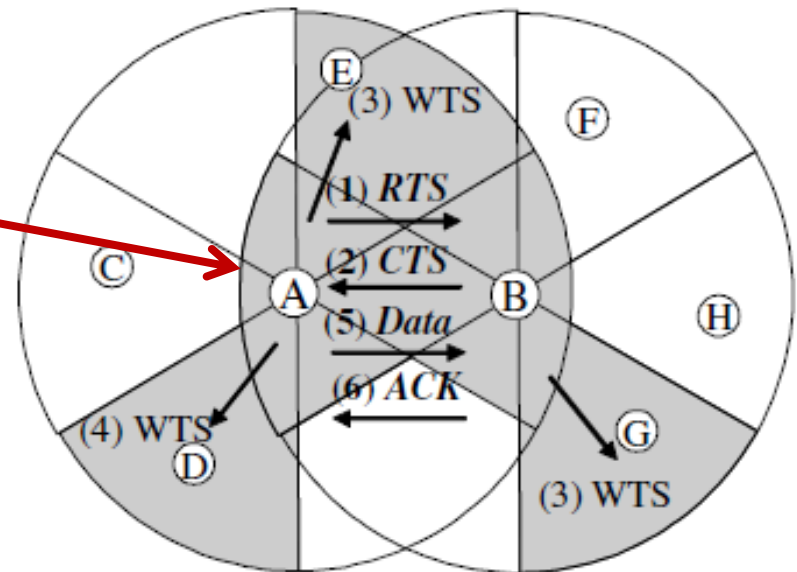


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- Operação:
 - Estação transmissora muda para modo direcional para envio do RTS
 - Se o potencial receptor for alcançado a partir de um feixe com potencial transmissor ou a partir de um feixe em NAV direcional (DNAV)

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}

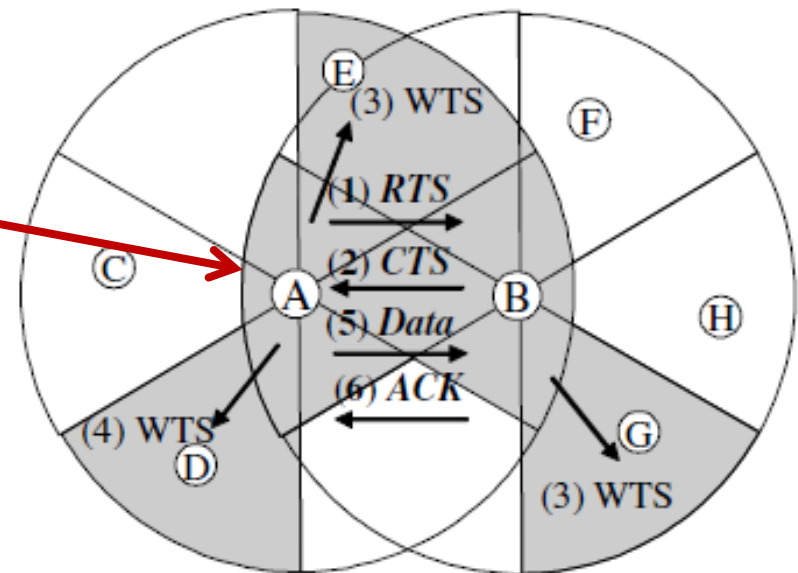


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- 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}

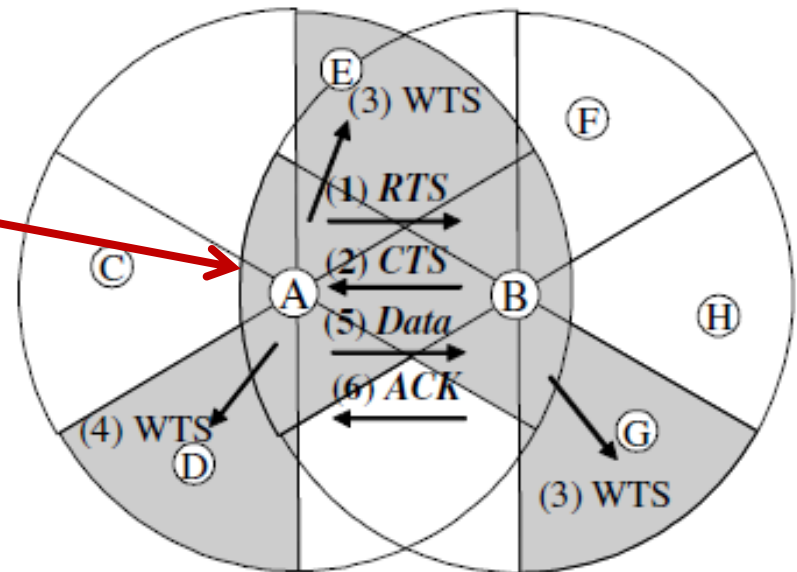


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- 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}

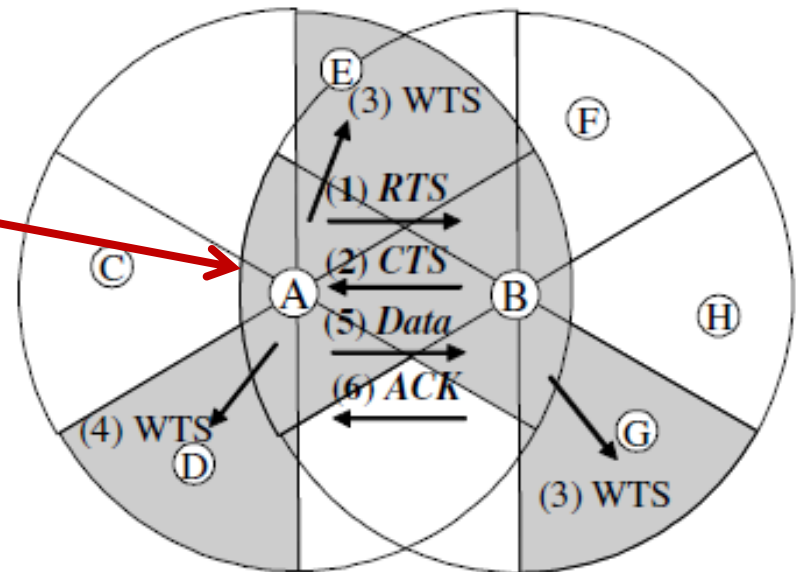


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

- 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}

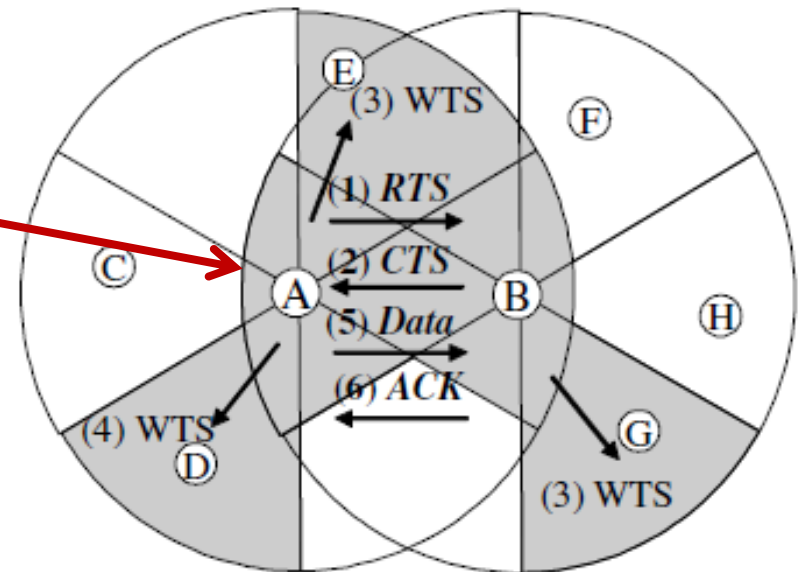


DMAC Não-circular: DRTS/DCTS

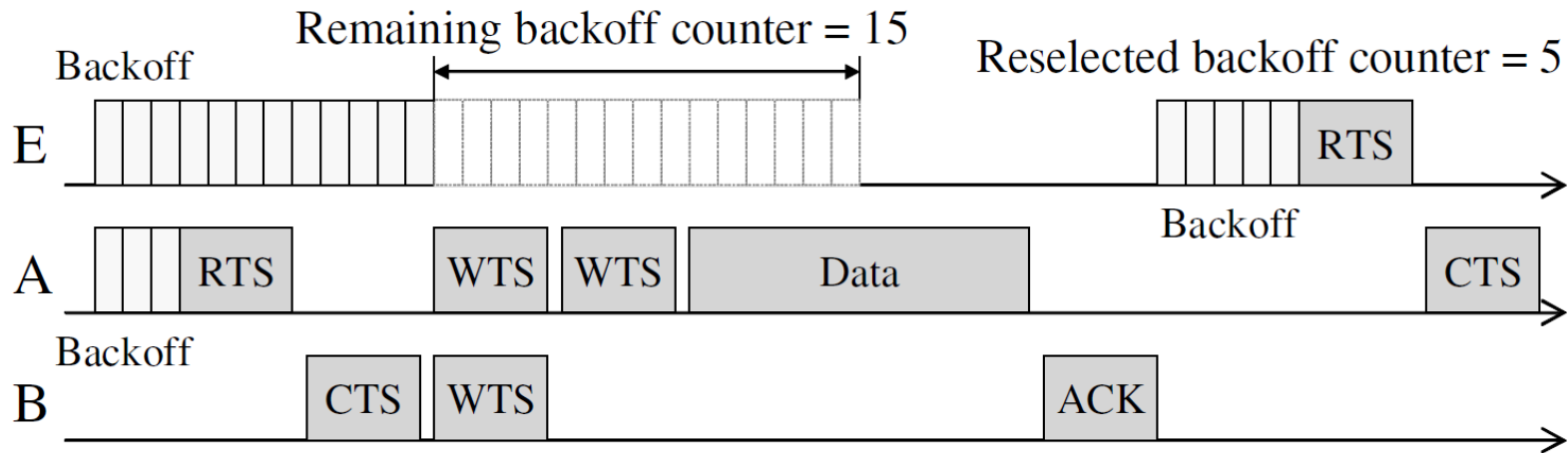
- Operação:
 - Depois dos WTSes...
 - Estações enviam dados e ACK em modo direcional
 - Depois que os dados forem enviados e confirmados
 - Estações voltam ao modo omni

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 Circular: CRTS/DCTS

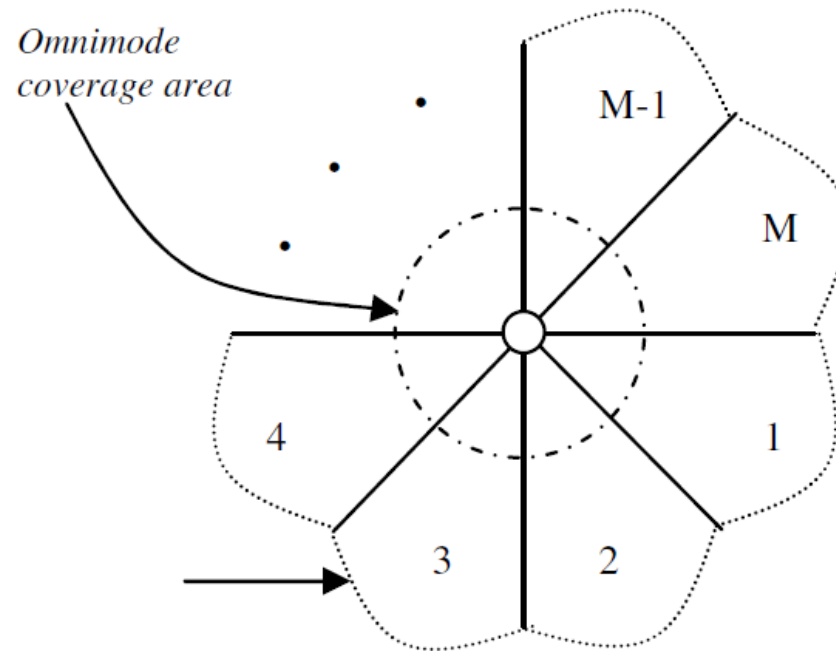
- Proposta de protocolo deve partir de 4 premissas:
 - Protocolo deve usar apenas as antenas direcionais
 - Protocolo deve avisar vizinhos sobre possíveis transmissões
 - Assim evitar problema do terminal escondido
 - Protocolo deve lidar com problemas de surdez
 - Protocolo deve manter informações de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

DMAC Circular: CRTS/DCTS

- 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

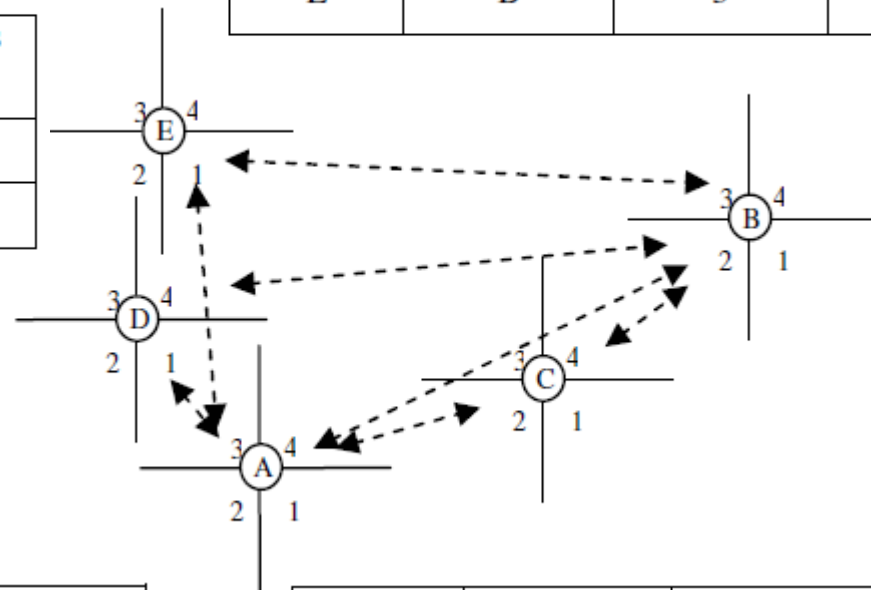
DMAC Circular: CRTS/DCTS

- 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	3	3
E	B	3	3

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



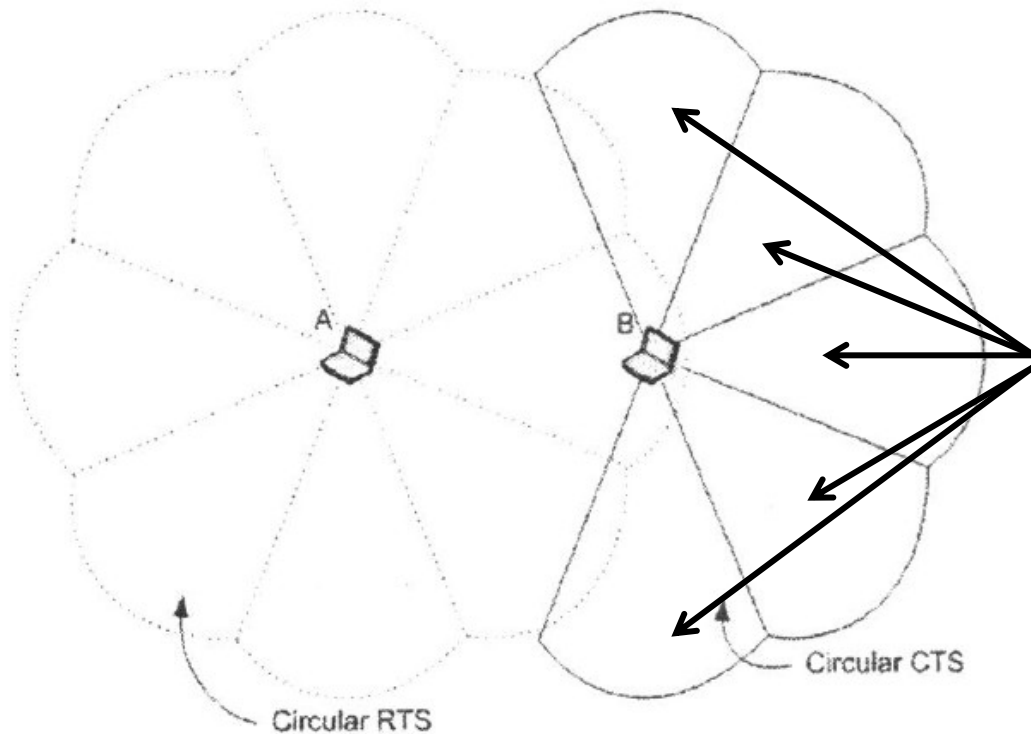
Me	Neighbor	My Beam	Neighbor's Beam
A	B	4	2

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



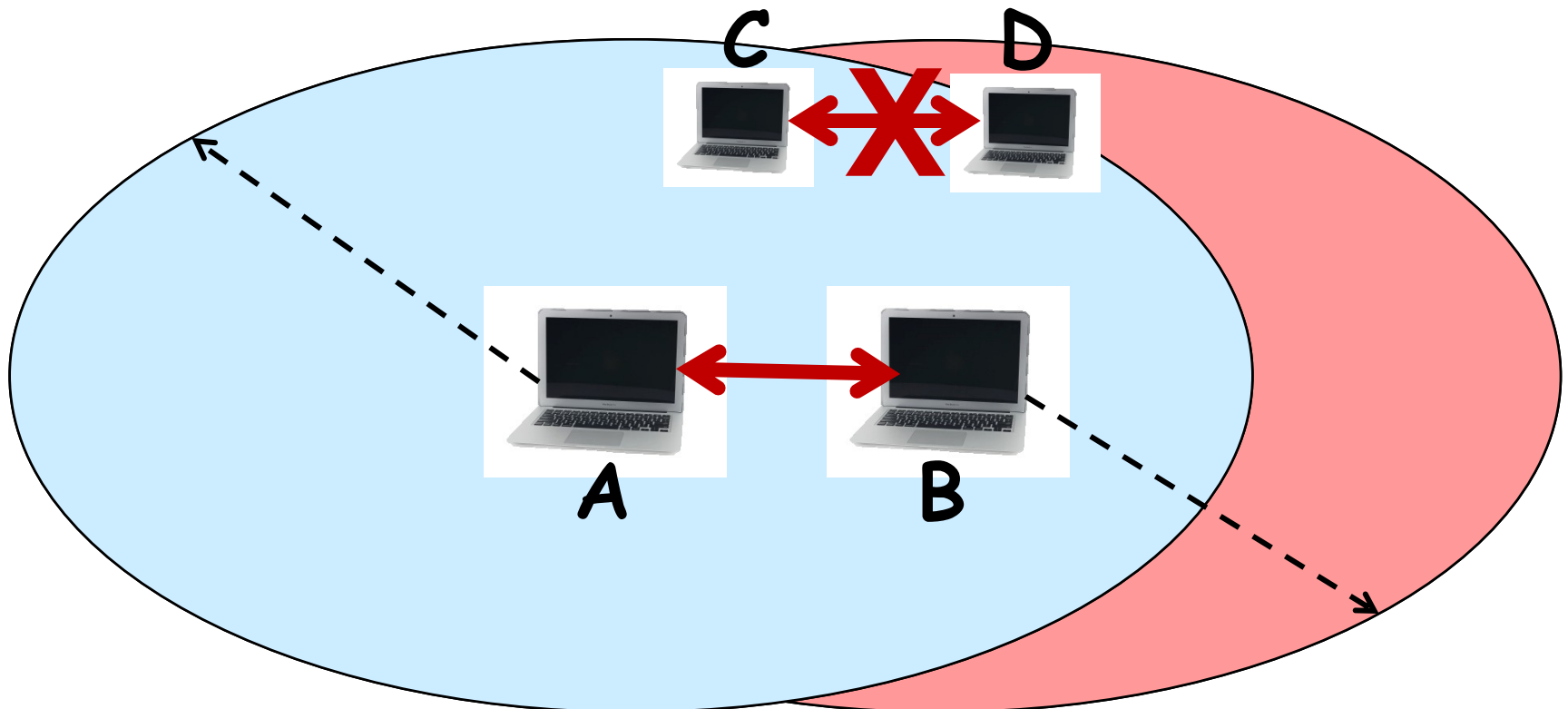
Estações que também recebem CTS direcional além da estação de origem do RTS

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"

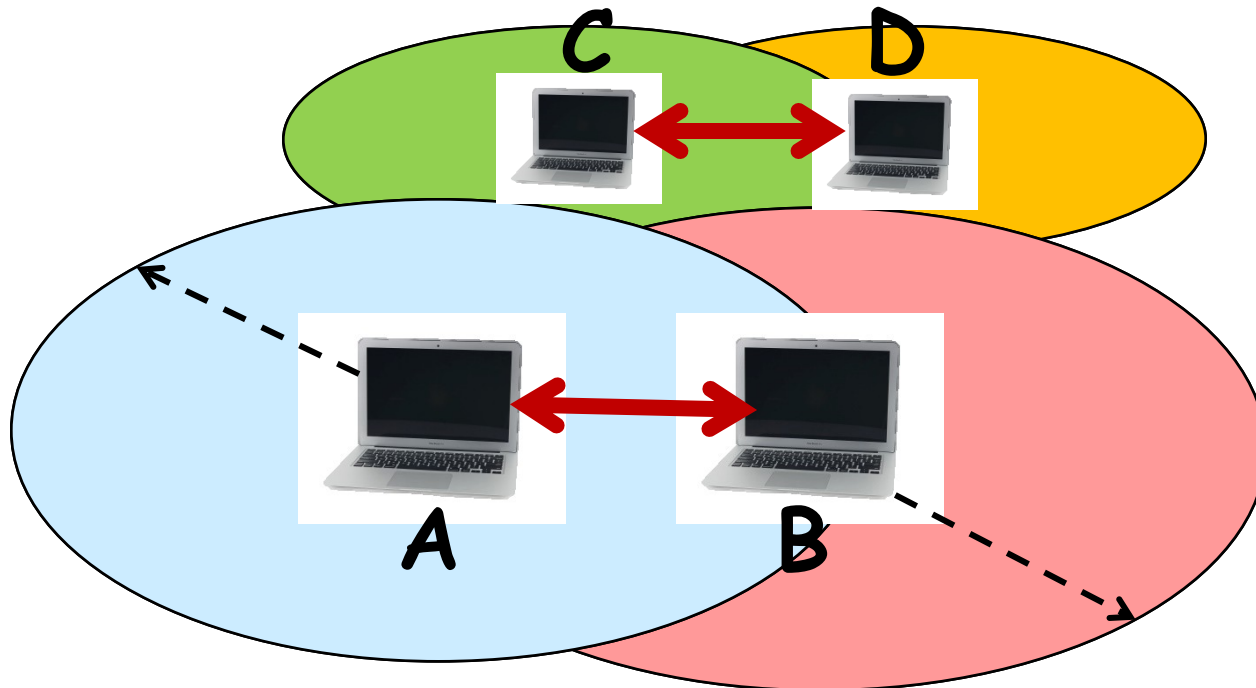
Controle de Potência

- 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



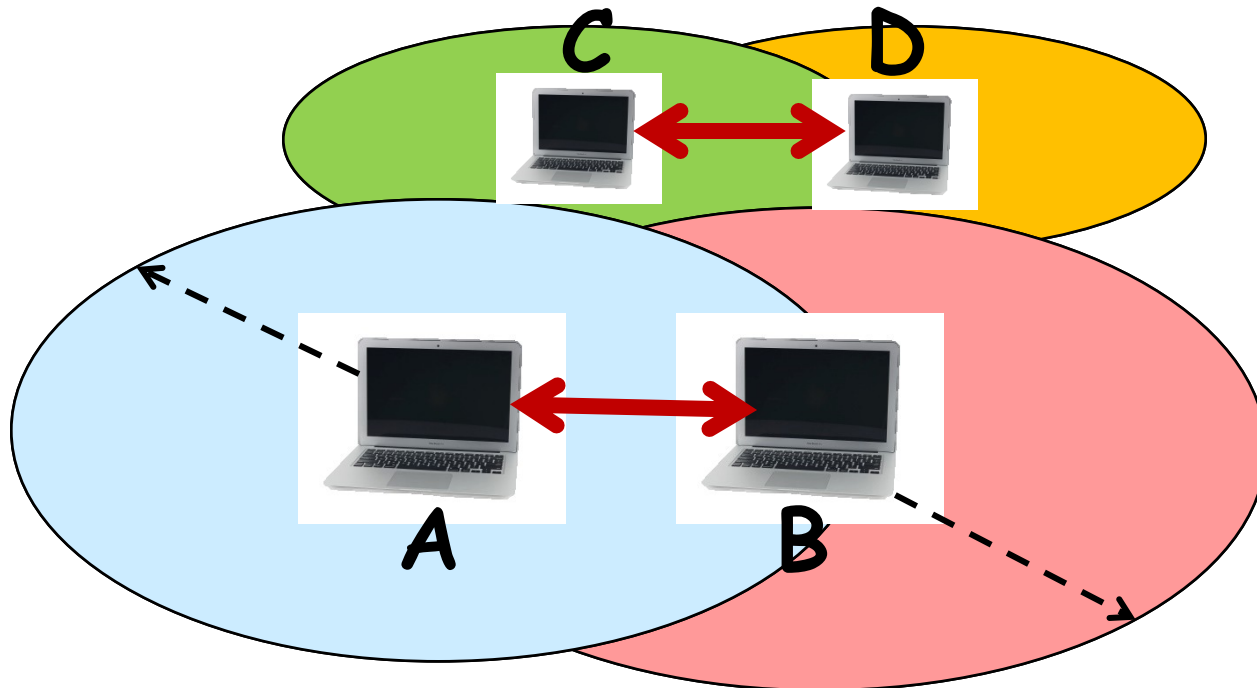
Controle de Potência

- 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



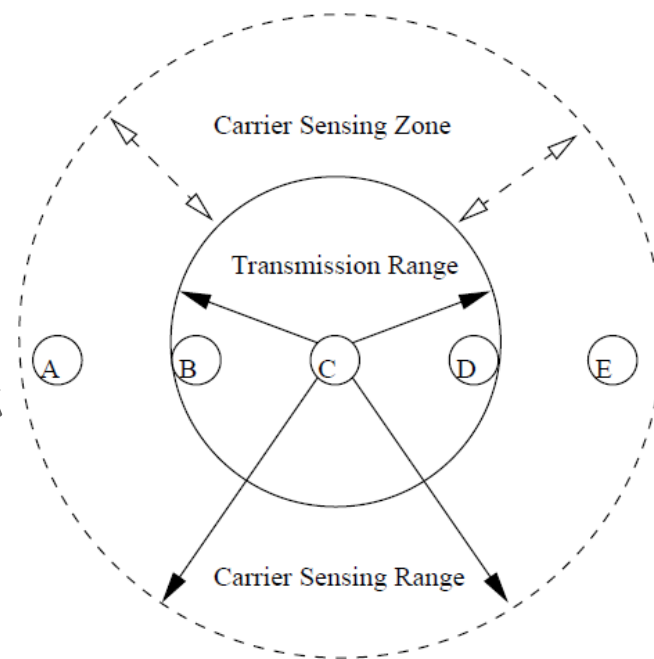
Controle de Potência

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

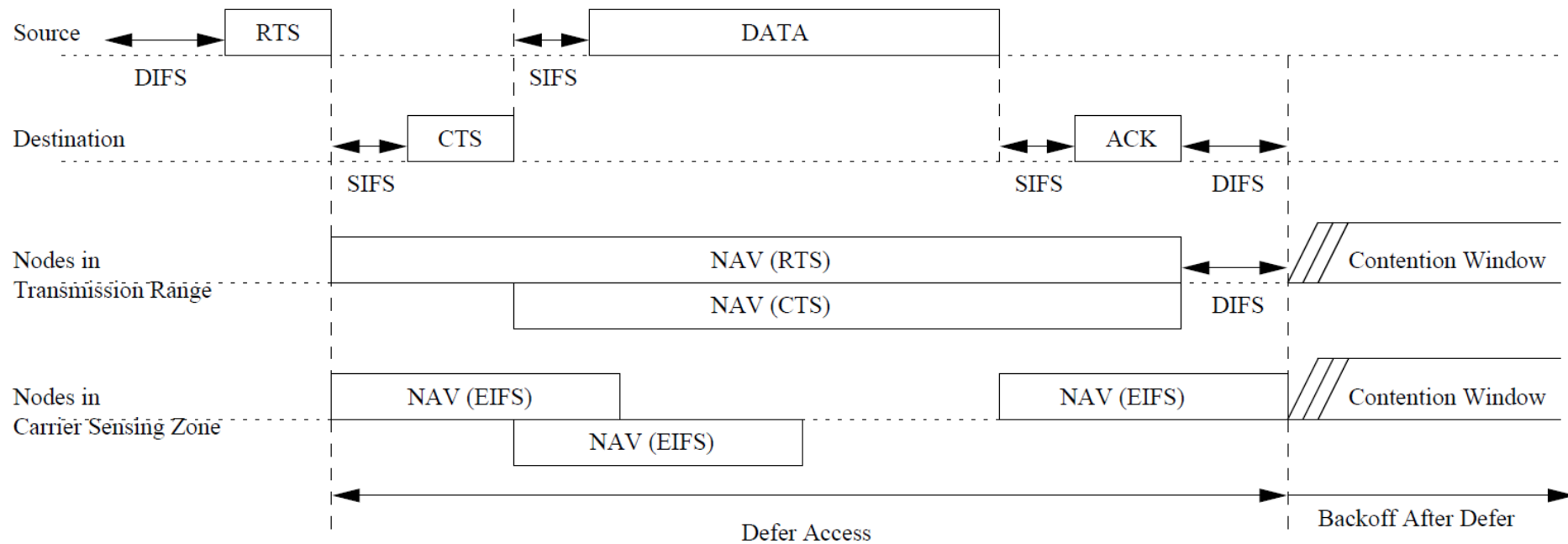


Controle de Potência: Definições

- 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



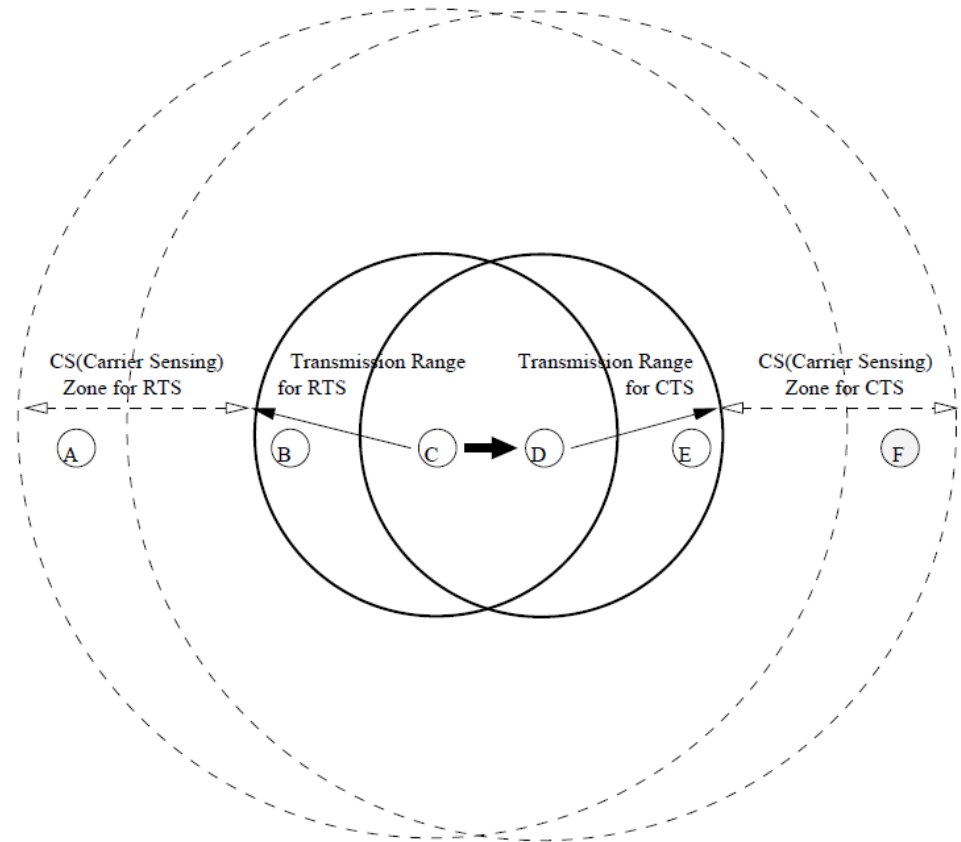
Acesso ao Meio



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

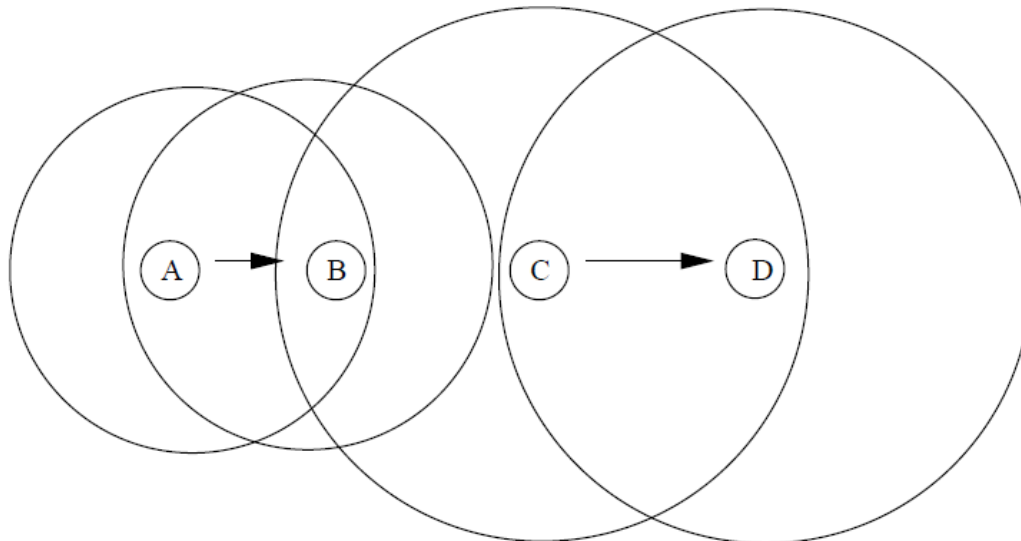
Acesso ao Meio

**EIFS 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

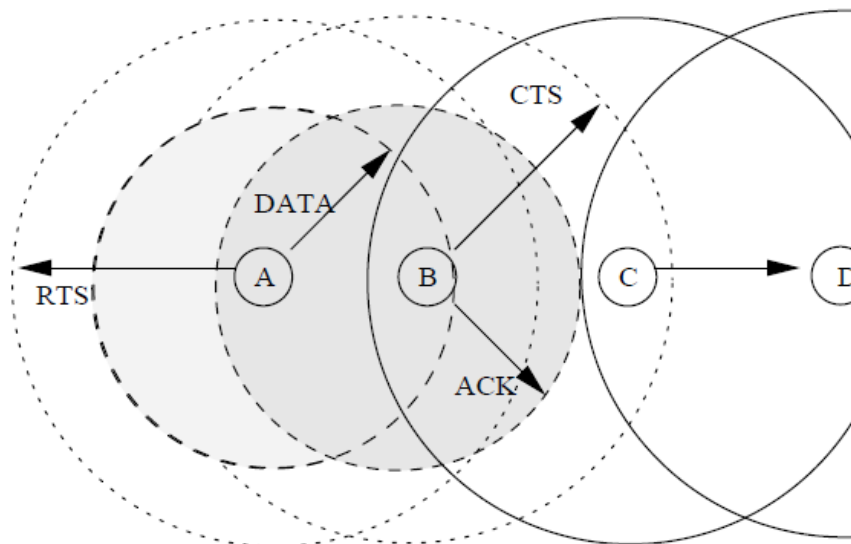
- Controle de potência individual pode gerar:
 - Assimetrias
 - Estação A pode alcançar B, mas não o contrário
 - Colisões
 - Ex. C ignora transmissão entre AB com potência mais baixa e acessa o meio causando colisão



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

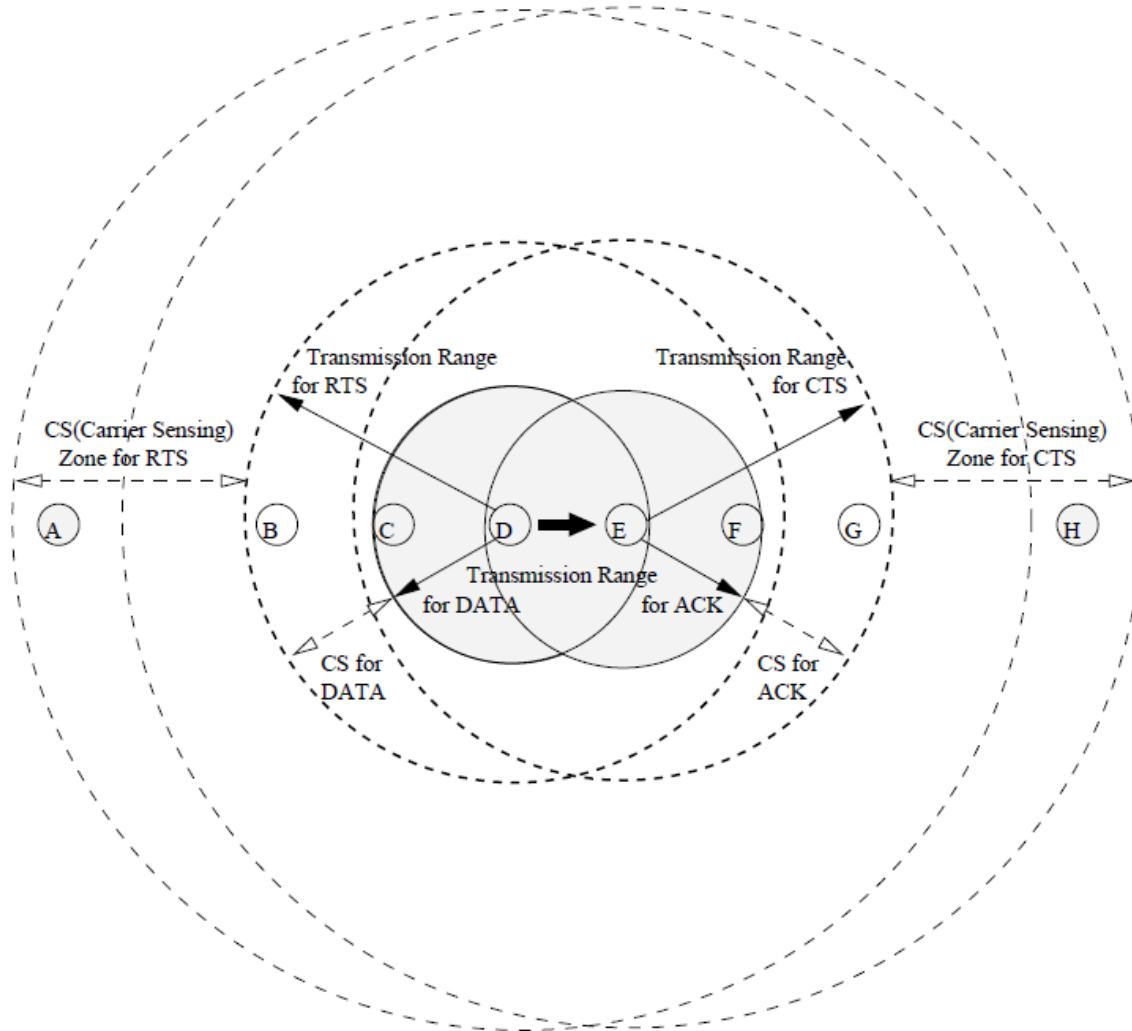
- Potência de transmissão pode ser ajustada de duas formas... **segunda forma:**
 - Estação de origem envia RTS em potência máxima p_{max}
 - Estação de destino recebe o RTS e também envia CTS com potência p_{max}
 - Estação de origem ao receber CTS com potência p_r calcula $p_{desejado}$
 - Estação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

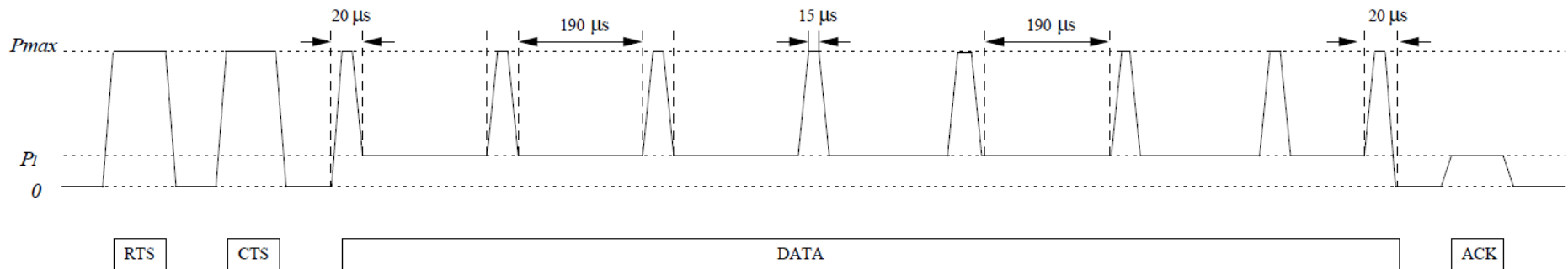
Problema das Duas Alternativas



**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

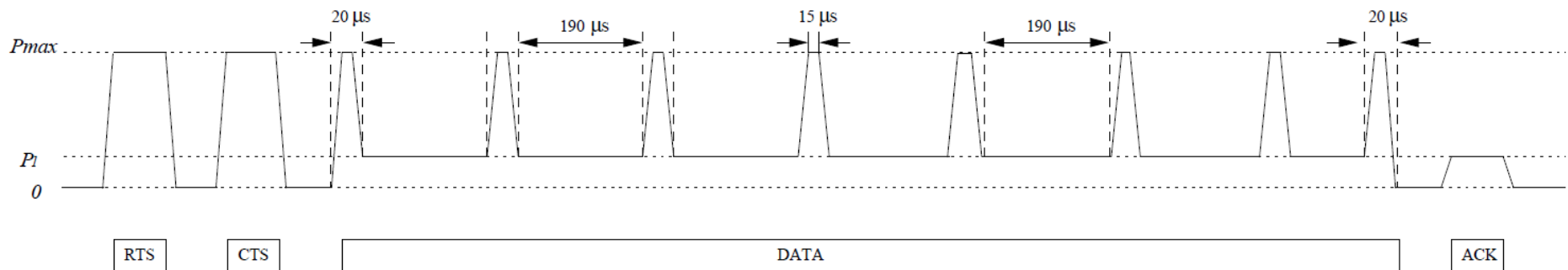
- Operação:
 - RTS/CTS são enviados na potência máxima P_{max}
 - Estação de origem pode enviar dados com potência mais baixa
 - Porém, periodicamente, a estação de origem transmite os dados com potência máxima
 - Estação de destino envia ACK com potência mais baixa



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