

CPE710: Redes Móveis

Prof. Miguel Elias Mitre Campista

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

CPE710: Redes Móveis

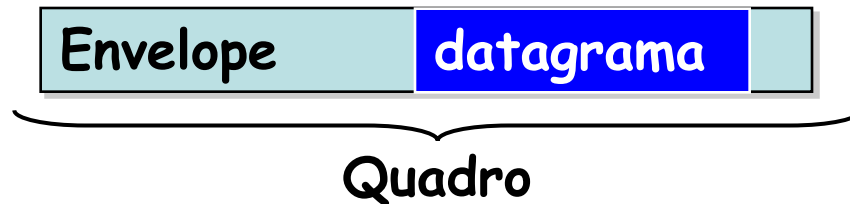
PROTOCOLOS DE CAMADA DE ENLACE

Camada de Enlace

- Presta serviço para a camada de rede:
 - **Serviço básico:** Prover comunicações eficiente e confiável de **unidades de informação** entre dois **nós adjacentes**
 - **O que é uma unidade de informação?**
 - **O que são nós adjacentes?**

Camada de Enlace

- **Unidade de informação:** Pacote de camada de enlace, também chamado de quadro (frame)
 - Quadros encapsulam datagramas da camada de rede



- **Nós adjacentes:** Nós conectados fisicamente por um canal de comunicação, também chamado de enlace
 - Enlace entrega todos os bits ao destinatário na mesma ordem de envio

Camada de Enlace

- Para oferecer serviços, os protocolos consideram...
 - Tipos diferentes de canais de comunicação:
 - **Canal ponto-a-ponto**
 - Uma estação em cada extremidade
 - Requer controle simples de acesso
 - » Exs.: Redes de acesso domiciliares e redes entre roteadores
 - **Canal de difusão (*broadcast*)**
 - Várias estações conectadas ao mesmo canal
 - Requer controle de acesso ao meio para coordenar as transmissões
 - » Ex. rede sem-fio

Camada de Enlace

- Por que o tipo do canal influencia na definição do protocolo de comunicação?

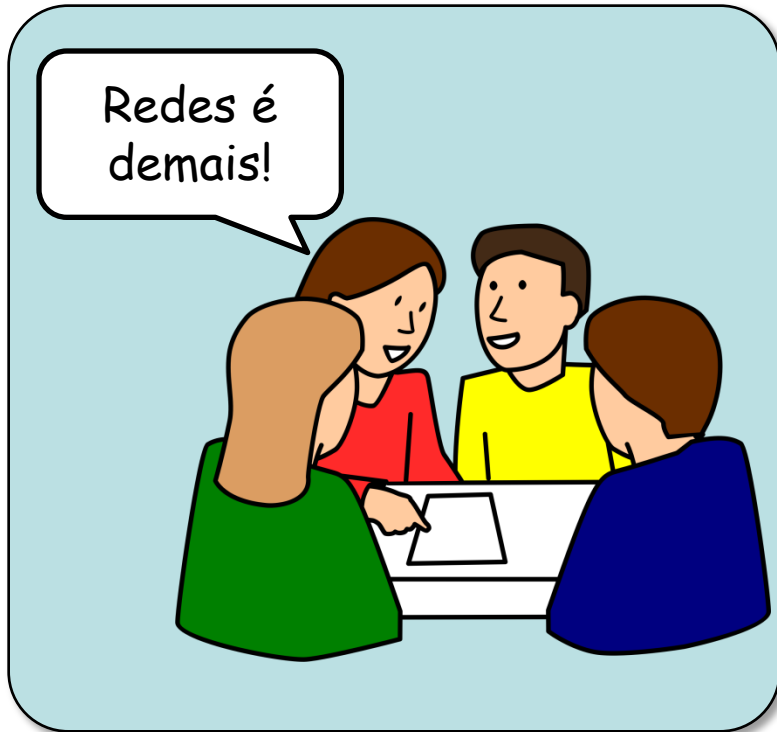
Camada de Enlace

- Por que o tipo do canal influencia na definição do protocolo de comunicação?

Principalmente porque a forma como o meio é acessado depende do tipo de canal...

Camada de Enlace

- Por que o tipo do canal influencia na definição do protocolo de comunicação?



≠

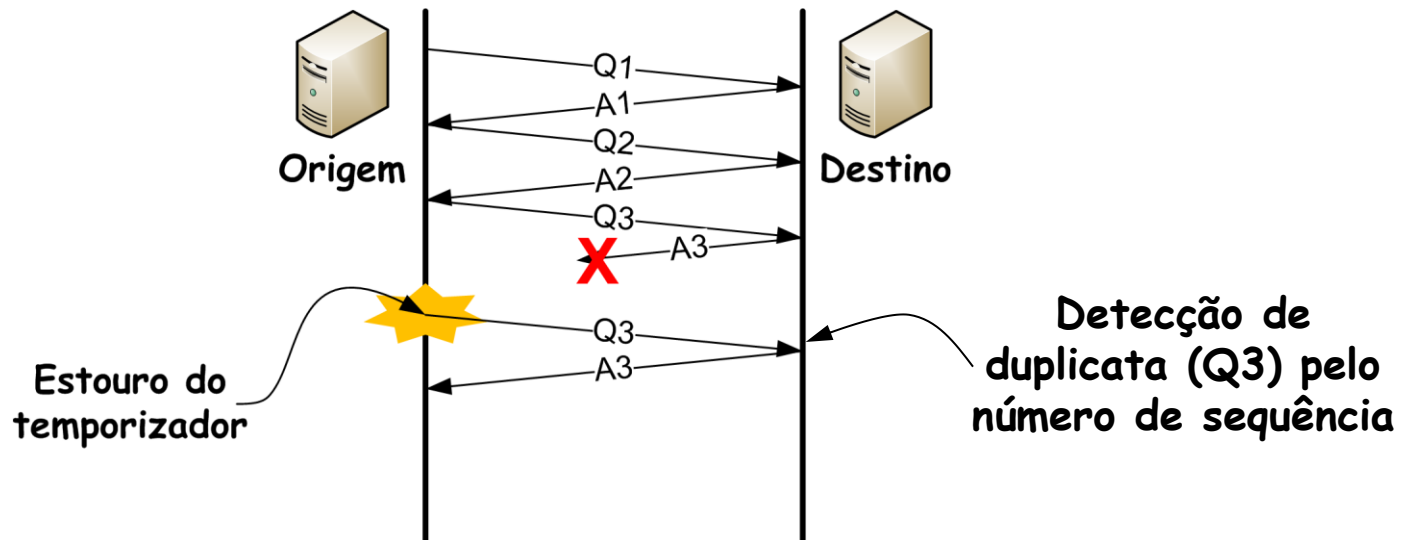


Tipos de Protocolos

- Protocolos Simplex: “Utópico”
 - Pacotes enviados de um transmissor para um receptor
 - Todos os pacotes são recebidos pois assume-se que o meio é sem perda e o transmissor não sobrecarrega o receptor
- Protocolos Simplex: Pare e Espere (*stop-and-wait*)
 - Pacotes enviados de um transmissor para um receptor
 - Se o transmissor puder sobrecarregar o receptor, uma nova transmissão só pode ser feita após a recepção do reconhecimento
 - Caso haja perda no meio, é necessário acrescentar número de sequência no pacote e temporizador
 - Basta um bit (0 ou 1) como número de sequência

Tipos de Protocolos

- Funcionamento do Pare e Espere
 - Transmissor só pode enviar um quadro por vez
 - Próximo quadro só pode ser transmitido após a recepção do reconhecimento positivo (ACK) do atual

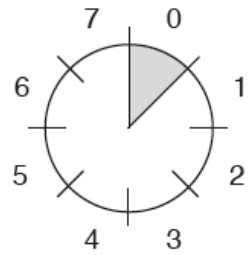
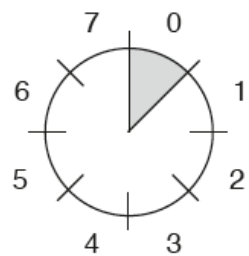
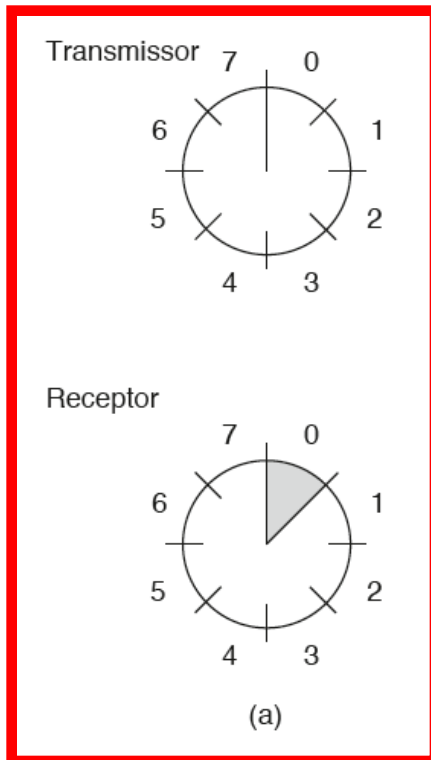


Tipos de Protocolos

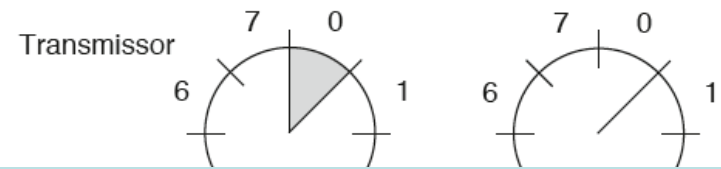
- Protocolos de Janela Deslizante
 - Pare e Espere com número de sequência usa janela deslizante
 - Transmissor e receptor possuem janelas de tamanho 1 com número de sequência de 1 bit
 - Porém, números de sequência maiores e tamanhos de janelas maiores podem ser usados
 - Pipeline de pacotes no meio torna o uso do canal mais eficiente
 - Especialmente interessante para meios com alto produto (largura de banda * atraso)

Tipos de Protocolos

- Protocolos de Janela Deslizante
 - Conjunto de números de sequência é alterado conforme:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



(b)



(c)

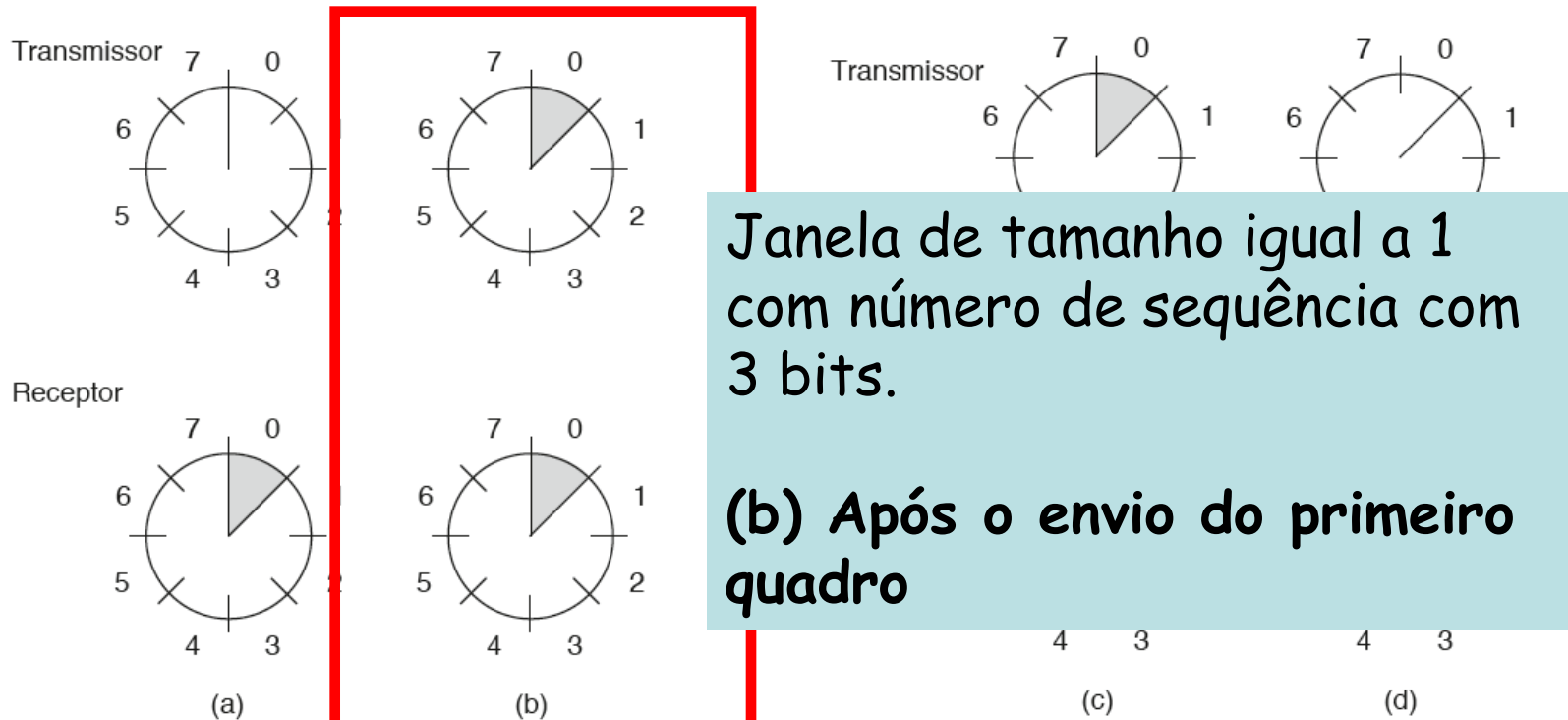
(d)

Janela de tamanho igual a 1 com número de sequência com 3 bits.

(a) Situação inicial

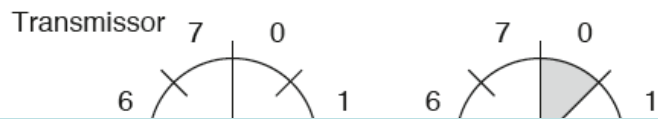
Tipos de Protocolos

- Protocolos de Janela Deslizante
 - Conjunto de números de sequência é alterado conforme:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



Tipos de Protocolos

- Protocolos de Janela Deslizante
 - Conjunto de números de sequência é alterado conforme:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



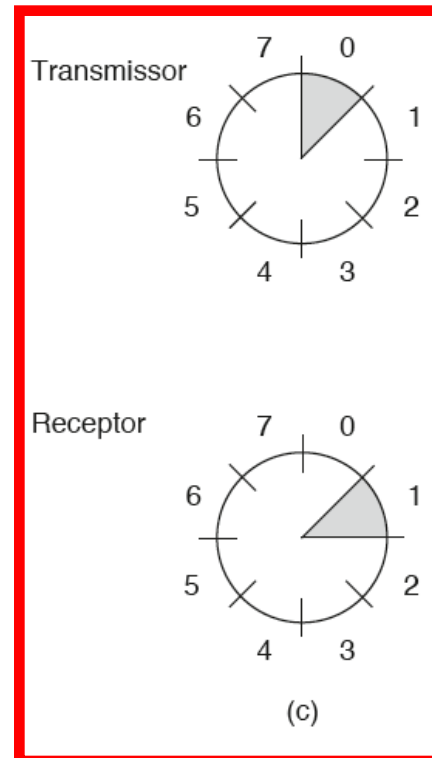
Janela de tamanho igual a 1 com número de sequência com 3 bits.

(c) Após receber o primeiro quadro



(a)

(b)

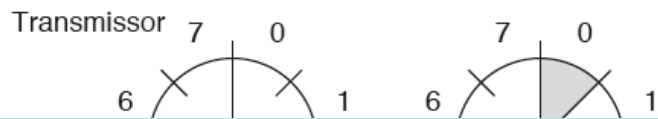


(c)

(d)

Tipos de Protocolos

- Protocolos de Janela Deslizante
 - Conjunto de números de sequência é alterado conforme:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



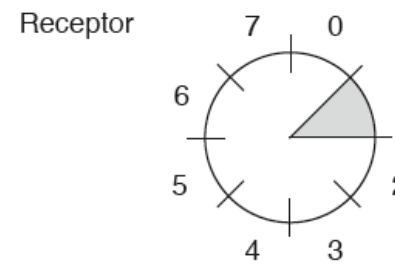
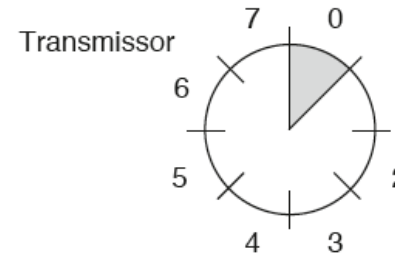
Janela de tamanho igual a 1 com número de sequência com 3 bits.

(d) Após receber o primeiro reconhecimento

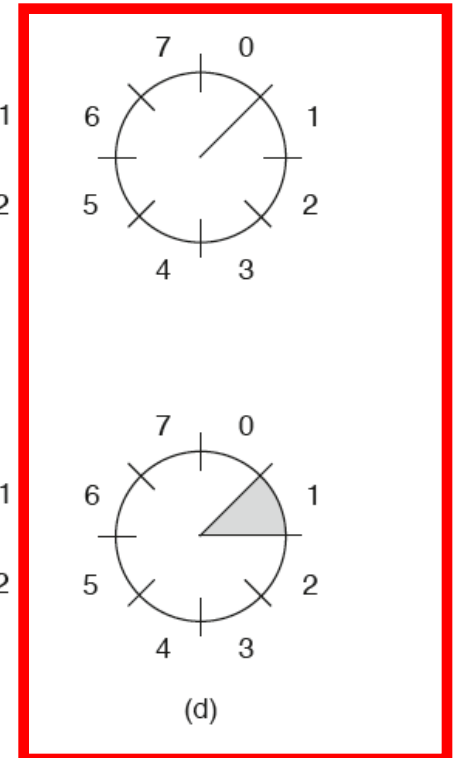


(a)

(b)



(c)

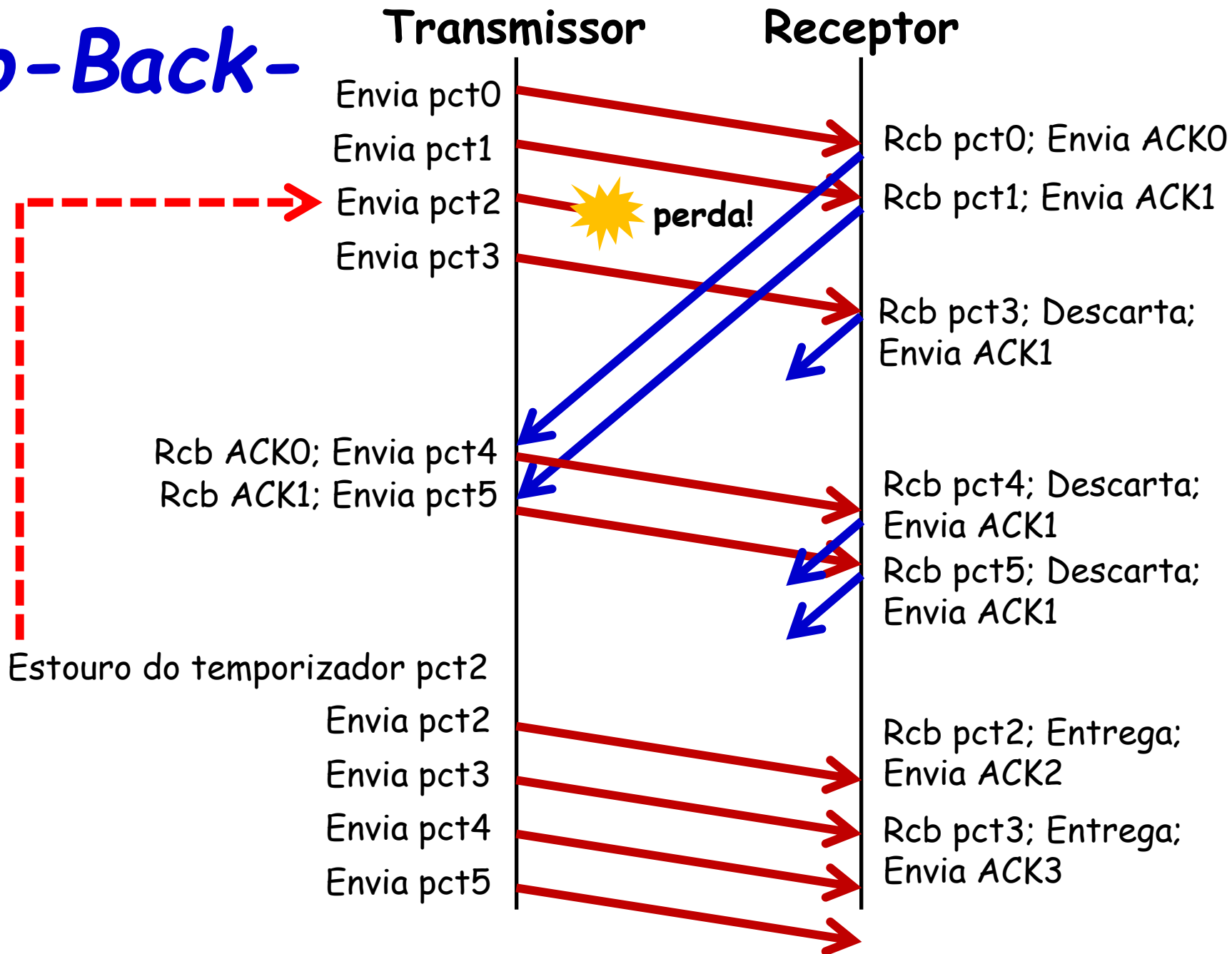


(d)

Tipos de Protocolos

- Protocolos de Janela Deslizante: *Go-Back-N*
 - Transmissor pode enviar até N pacotes não reconhecidos (“em trânsito”)
 - Janelas de transmissão e de recepção são iguais a N
 - Receptor envia apenas ACKs cumulativos
 - Não reconhece pacote se houver falha de sequência
 - Transmissor possui um temporizador para o pacote mais antigo ainda não reconhecido
 - Se o temporizador estourar, retransmite todos os pacotes ainda não reconhecidos

Go-Back-N

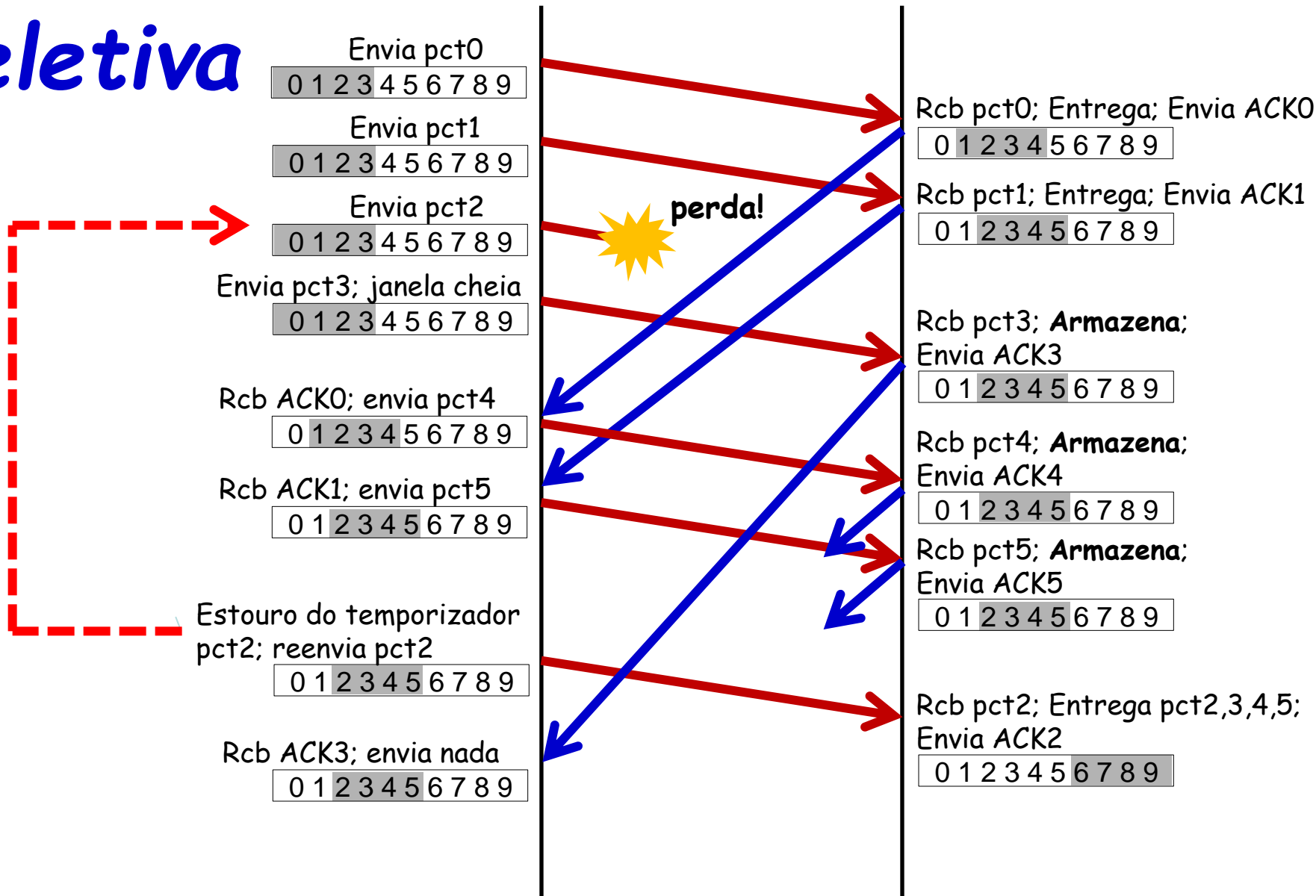


Tipos de Protocolos

- Protocolos de Janela Deslizante: **Retransmissão Seletiva**
 - Receptor reconhece individualmente todos os pacotes recebidos corretamente
 - Armazena pacotes no buffer, conforme necessário, para posterior entrega ordenada à camada superior
 - Transmissor apenas reenvia pacotes para os quais um ACK não foi recebido
 - Temporizador no remetente para cada pacote sem ACK
 - Janela de transmissão
 - N números de sequência consecutivos
 - Outra vez limita números de sequência de pacotes enviados, mas ainda não reconhecidos

Retransmissão Tx

Seletiva



Tipos de Protocolos

- Em redes sem fio é comum a denominação:
 - Protocolos livres de contenção (*contention free*)
 - Protocolos baseados em contenção (*contention based*)

**Contenção é sinônimo de espera para acessar o meio.
Importante principalmente quando mais de um nó
pode acessar o meio ao mesmo tempo**

Tipos de Protocolos

- Protocolos livre de contenção:
 - Fazem reserva de recursos
 - Nós não precisam realizar contenção para acessar o meio
 - Por exemplo, TDMA, CDMA, FDMA, polling e token-based
 - São empregados para garantir atraso fim-a-fim limitado e largura de banda mínima
 - Privilegia aplicações sensíveis a atrasos
 - Por exemplo, aplicações interativas
 - Podem ser ineficiente e levar a ociosidade do meio

Tipos de Protocolos

- Protocolos baseados em contenção
 - São mais apropriados para redes com transferências esporádicas de dados
 - Aplicações não sensíveis a atrasos e que não tenham requisitos mínimos de banda passante são boas candidatas à contenção
 - Redes sem fio dinâmicas também, dada a natureza temporária da topologia
 - Podem trazer maior eficiência no uso dos recursos caso o número de nós não seja muito elevado
 - Muitos nós podem levar a muitas colisões

Protocolos de Camada de Enlace: Canal de Difusão

Controle de Acesso ao Meio

- Protocolos de múltiplo acesso usados em canais de difusão
 - Coordenação de transmissores e de receptores em um canal de difusão compartilhado
 - São algoritmos distribuídos que determinam como os nós compartilham o canal
 - Determinam quando um nó pode transmitir
 - Comunicação sobre o compartilhamento do canal deve usar o próprio canal!
 - Não há canal fora da banda para coordenar a transmissão

Por que o Acesso ao Meio Precisa Ser Controlado?

- Para evitar interferência entre transmissões simultâneas
 - Quando dois ou mais nós transmitem ao mesmo tempo, uma **colisão** pode ocorrer no nó receptor caso dois ou mais sinais cheguem ao mesmo tempo...

Protocolo Ideal de Acesso Múltiplo

- Para um canal de difusão com taxa de R b/s:
 1. Quando apenas um nó tem dados para enviar, esse nó obtém uma vazão de R b/s
 2. Quando M nós têm dados para enviar, cada um desses nós poderá transmitir em média a uma taxa de R/M b/s
 3. O protocolo é completamente descentralizado
 - Nenhum nó especial (mestre) coordena as transmissões e nem se torna um ponto de falha
 4. O protocolo é simples para que sua implementação seja barata

Classes de Protocolos de Acesso Múltiplo

- Protocolos baseados em contenção
 - Protocolos de Acesso Aleatório
 - Canal não é dividido, podem ocorrer colisões
 - "Recupera" as colisões
- Protocolos livres de contenção
 - Protocolos de Divisão de Canal
 - Divide o canal em pequenos "pedaços" (slots de tempo, frequências, códigos...)
 - Aloca pedaços a um nó para seu uso exclusivo
 - Protocolos de Revezamento
 - Nós se revezam no acesso ao meio
 - Alternam oportunidades de acesso ao meio sem que ninguém tente acessar ao mesmo tempo

Protocolos Baseados em Contenção (Acesso Aleatório)

Protocolos Baseados em Contenção

- Quando um nó tiver um quadro a transmitir...
 - Tenta transmitir à taxa máxima do canal sem nenhuma coordenação *a priori* entre os nós
- Entretanto, se dois ou mais nós transmitirem ao mesmo tempo:
 - Há uma colisão!
 - Acesso ao meio é realizado de forma não determinística
- Nesse cenário, o protocolo de acesso aleatório específica:
 - Como detectar colisões e como se recuperar delas
 - Através de retransmissões retardadas, por exemplo

Protocolos Baseados em Contenção

- Aloha
- *Slotted Aloha*
- CSMA persistente
- CSMA não persistente
- CSMA p-persistente
- CSMA/CD
- Outros

Rede Aloha

- Criada por Norman Abramson em 1960
- Primeira rede baseada em pacotes
- Interligação de computadores em várias ilhas do Havaí compartilhando um meio (RF)
 - Comunicação com um computador central
 - Disputa do meio

Protocolo Aloha

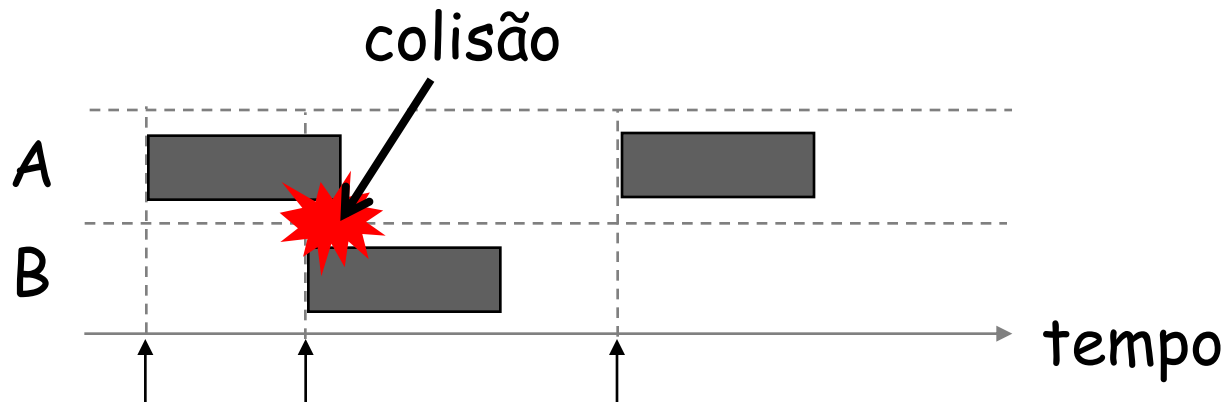
- Estação transmite quando desejar
 - Não há escuta do meio...
 - Se o quadro for recebido sem erros
 - Um reconhecimento positivo é enviado ao remetente
 - Se duas ou mais estações transmitirem ao mesmo tempo
→ **Colisão!**
 - Colisão inferida ao não receber o reconhecimento positivo após um intervalo de tempo pré-determinado
 - Se o quadro for recebido com erro
 - Remetente também não recebe reconhecimento positivo

Protocolo Aloha

- Se o reconhecimento positivo não for recebido...
 - Quadro é retransmitido...
 - Retransmissão após um tempo aleatório para redução da probabilidade de nova colisão
 - Processo é repetido continuamente até que o reconhecimento positivo seja recebido pelo remetente

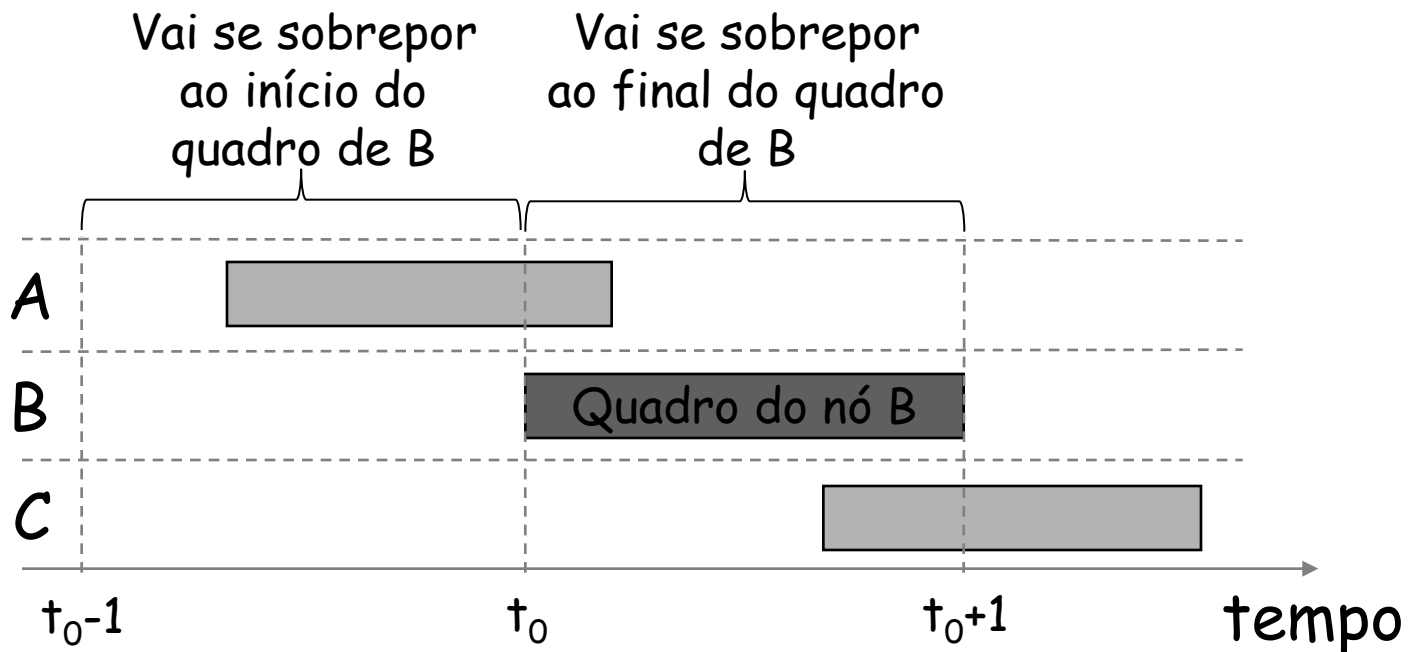
Protocolo Aloha

- Baixa eficiência
 - Cálculo a seguir



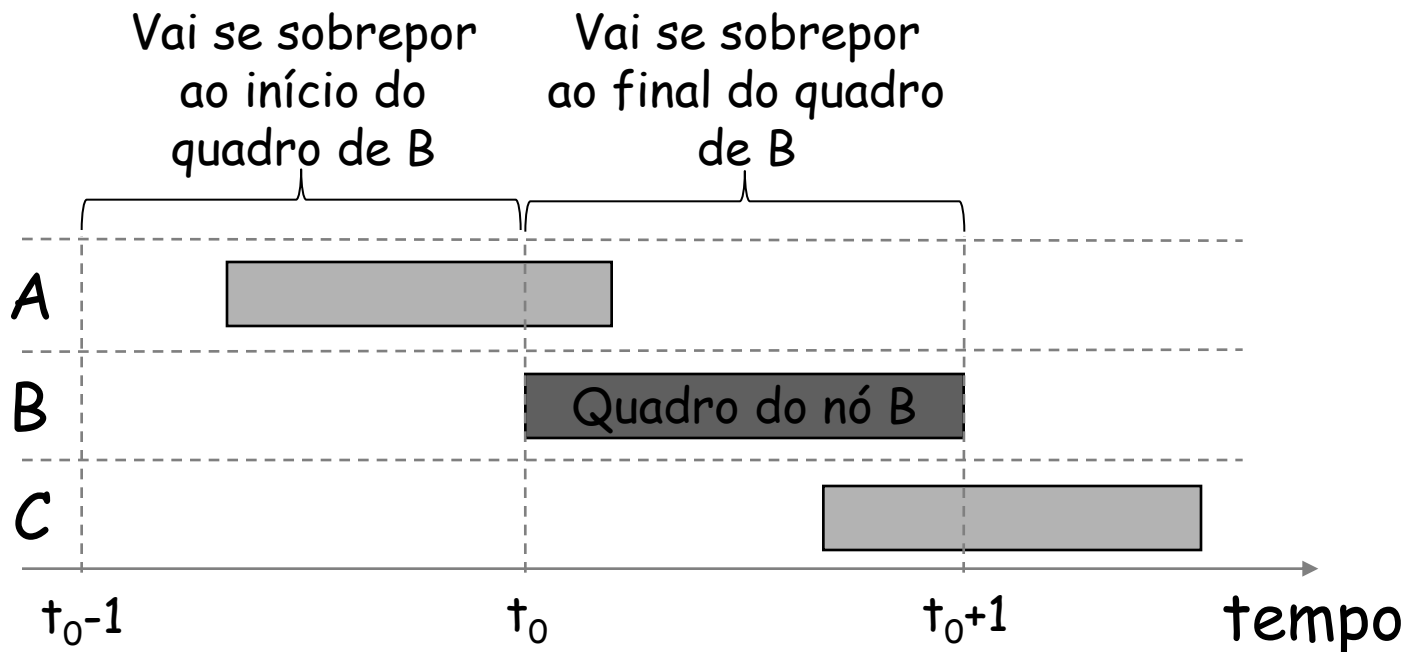
Eficiência do Aloha

- Probabilidade de colisão
 - Quadro enviado em t_0 colide com outros quadros enviados em $[t_0-1, t_0+1]$



Eficiência do Aloha

- $P(\text{sucesso de um nó}) = P(\text{nó transmite})$
 - * $P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0-1, t_0])$
 - * $P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0, t_0+1])$



Eficiência do Aloha

- $P(\text{sucesso de um nó}) = P(\text{nó transmite})$
 - * $P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0-1, t_0])$
 - * $P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0, t_0+1])$



$$P(\text{sucesso de um nó}) = p \cdot (1-p)^{n-1} \cdot (1-p)^{n-1} = p \cdot (1-p)^{2(n-1)}$$



Eficiência baixa... ☹️

$$P(\text{sucesso por um dado nó}) = 1/2e \approx \mathbf{18\%}$$

Considerando p ótimo (p^*) e n tendendo ao infinito...

Eficiência do Aloha

- Cálculo do p ótimo (p^*):

$$d[n.p^*. (1-p^*)^{2(n-1)}] / dp = 0$$

$$\Rightarrow n.(1-p^*)^{2(n-1)} + n.p^*.2.(n-1).(1-p^*)^{2(n-1)-1}.(-1) = 0$$

$$\Rightarrow n.(1-p^*)^{2(n-1)} - n.p^*.2.(n-1).(1-p^*)^{2(n-1)-1} = 0$$

$$\Rightarrow n.(1-p^*)^{2(n-1)} - n.p^*.2.(n-1).(1-p^*)^{2(n-1)} / (1-p^*) = 0$$

$$\Rightarrow [n.(1-p^*)^{2(n-1)}] [1 - 2.p^*. (n-1) / (1-p^*)] = 0$$

$$\Rightarrow 1-p^* = 2.p^*. (n-1) \Rightarrow 1 = p^*. (2.n-2) + p^*$$

$$\Rightarrow 1 = p^*. (2.n - 2 + 1) \Rightarrow p^* = 1 / (2n - 1)$$

- Substituindo p^* em $n.p.(1-p)^{2(n-1)}$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [n / (2n-1)]. [(1-1/(2n-1))^{2(n-1)}]$$

$$\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} [n / (2n-1)]. \lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/(2n-1))^{2(n-1)}] = 1/2.1/e = 1/2e$$

- Lembrando que $\lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^n] = 1/e$

Slotted Aloha

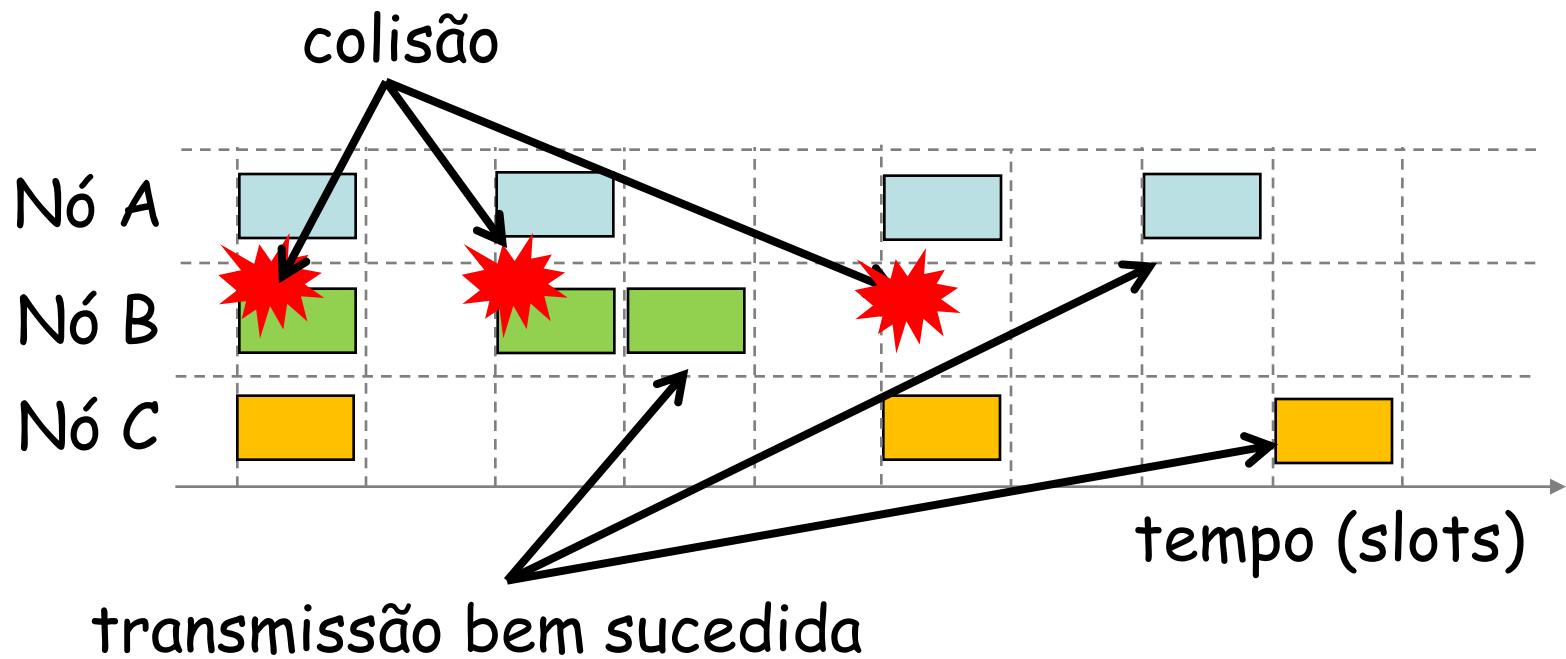
- Hipóteses:
 - Todos os quadros têm o mesmo tamanho (L bits)
 - Tempo é dividido em *slots* de tamanho igual
 - Tempo para transmitir 1 quadro (L/R seg)
 - Nós começam a transmitir quadros apenas no início dos intervalos (*slots*)
 - Nós são sincronizados
 - Problema...
 - Se dois ou mais nós transmitirem em um *slot*, todos os nós envolvidos detectam a colisão

Slotted Aloha

- Operação
 - Quando o nó obtém um novo quadro, ele espera até o início do próximo *slot* e transmite o quadro inteiro
 - Se não houver colisão, o nó poderá enviar um novo quadro no próximo *slot*
 - Caso haja uma colisão (detectada antes do final do intervalo), o nó retransmite o quadro em intervalo subsequente com **probabilidade p** até obter sucesso

Slotted Aloha

- Operação



Slotted Aloha

- Vantagens
 - Único nó ativo pode transmitir continuamente na taxa máxima do canal
 - Altamente descentralizado
 - *Apenas os slots nos nós precisam estar sincronizados*
 - Simples

Slotted Aloha

- Desvantagens
 - Quando há colisões
 - *Slots desperdiçados*
 - *Slots ociosos*
 - *Desperdício*
 - *Retransmissões em slots aleatórios podem gerar slots ociosos*
 - Requer a sincronização dos relógios
 - *Assume-se relógio global usado por todos os nós*

Eficiência do *Slotted Aloha*

- Eficiência
 - Fração de longo prazo de *slots* bem sucedidos quando há muitos nós cada um com muitos quadros para transmitir
- Assuma n nós com muitos quadros para enviar
- Cada um transmite num *slot* com probabilidade p
- Probabilidade que nó 1 tenha sucesso em um slot
 - $p(1-p)^{n-1}$
- Probabilidade que qualquer nó tenha sucesso
 - $np(1-p)^{n-1}$

Eficiência do *Slotted Aloha*

- Para eficiência máxima com n nós
 - Encontrar p^* que maximiza $np(1-p)^{n-1}$
- Para muitos nós, faça limite para $np(1-p)^{n-1}$
 - Quando $n \rightarrow \infty$, eficiência = $1/e = 37\%$

Mais eficiente, mas ainda é baixa!

Eficiência do *Slotted Aloha*

- Cálculo do p^* ótimo (p^*):

$$d[n.p^*. (1-p^*)^{(n-1)}] / dp = 0$$

$$\Rightarrow n.(1-p^*)^{(n-1)} + n.p^*. (n-1).(1-p^*)^{(n-1)-1}.(-1) = 0$$

$$\Rightarrow n.(1-p^*)^{(n-1)} - n.p^*. (n-1).(1-p^*)^{(n-1)-1} = 0$$

$$\Rightarrow n.(1-p^*)^{(n-1)} - n.p^*. (n-1).(1-p^*)^{(n-1)} / (1-p^*) = 0$$

$$\Rightarrow [n.(1-p^*)^{(n-1)}][1 - p^*. (n-1) / (1-p^*)] = 0$$

$$\Rightarrow 1-p^* = p^*. (n-1) \Rightarrow 1 = p^*. (n-1) + p^*$$

$$\Rightarrow 1 = p^*. (n - 1 + 1) \Rightarrow p^* = 1/n$$

- Substituindo p^* em $n.p.(1-p)^{(n-1)}$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^{(n-1)}]$$

$$\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^n] / \lim_{n \rightarrow \infty} [1-1/n] = 1/e$$

- Lembrando que $\lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^n] = 1/e$

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

- Uso de **escuta de portadora** (sinal no meio)
 - Escuta o meio antes de transmitir
 - Se o canal estiver livre, transmite o quadro
 - Se o canal estiver ocupado, adia a transmissão
 - Objetivo → **evitar colisões!**
- Analogia humana: não interrompa os outros!
 - Escute antes de falar
 - Escuta de portadora
 - Se alguém começa a falar junto de você, pare de falar
 - Detecção de colisão (nem sempre é possível)

CSMA Vs. Aloha

- Aloha não escuta o meio
- Aloha não detecta colisão

Tipos de CSMA

- **Motivação: aumentar a eficiência**
- **Vários tipos**
 - CSMA persistente
 - CSMA não-persistente
 - CSMA p-persistente
 - CSMA/CA
 - CSMA/CD

Colisão de Quadros

- Se todos os nós escutam o meio antes de transmitir, ainda existem colisões?

Sim!
Mas por quê?

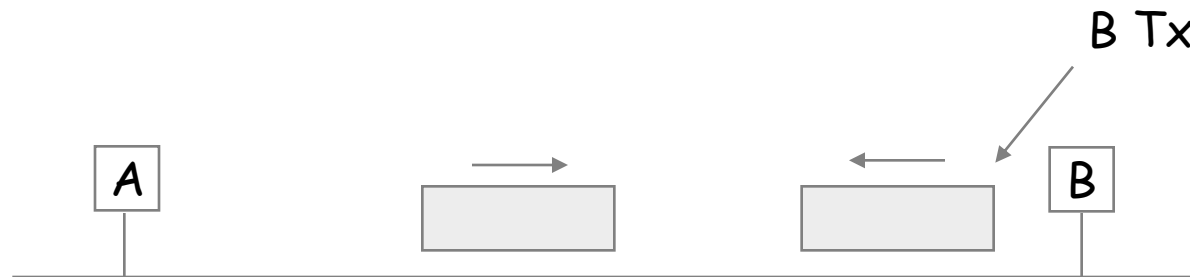
Colisão de Quadros

- Estação que quer transmitir um quadro ouve o meio
- Mesmo com a escuta da portadora, ainda podem ocorrer colisões
- Duas ou mais estações escutam o meio
 - Não escutam a transmissão da outra devido ao **atraso de propagação do sinal**



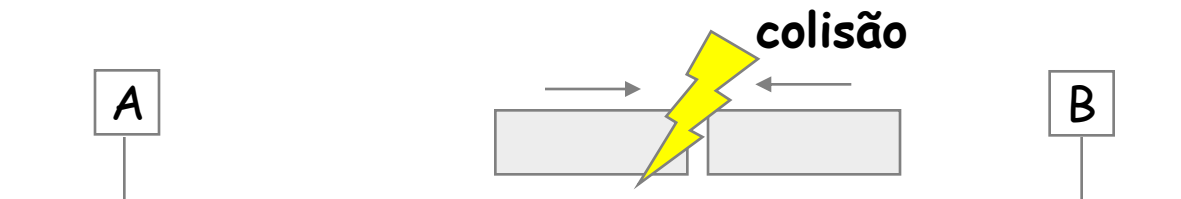
Colisão de Quadros

- Estação que quer transmitir um quadro ouve o meio
- Mesmo com a escuta da portadora, ainda podem ocorrer colisões
- Duas ou mais estações escutam o meio
 - Não escutam a transmissão da outra devido ao atraso de propagação do sinal



Colisão de Quadros

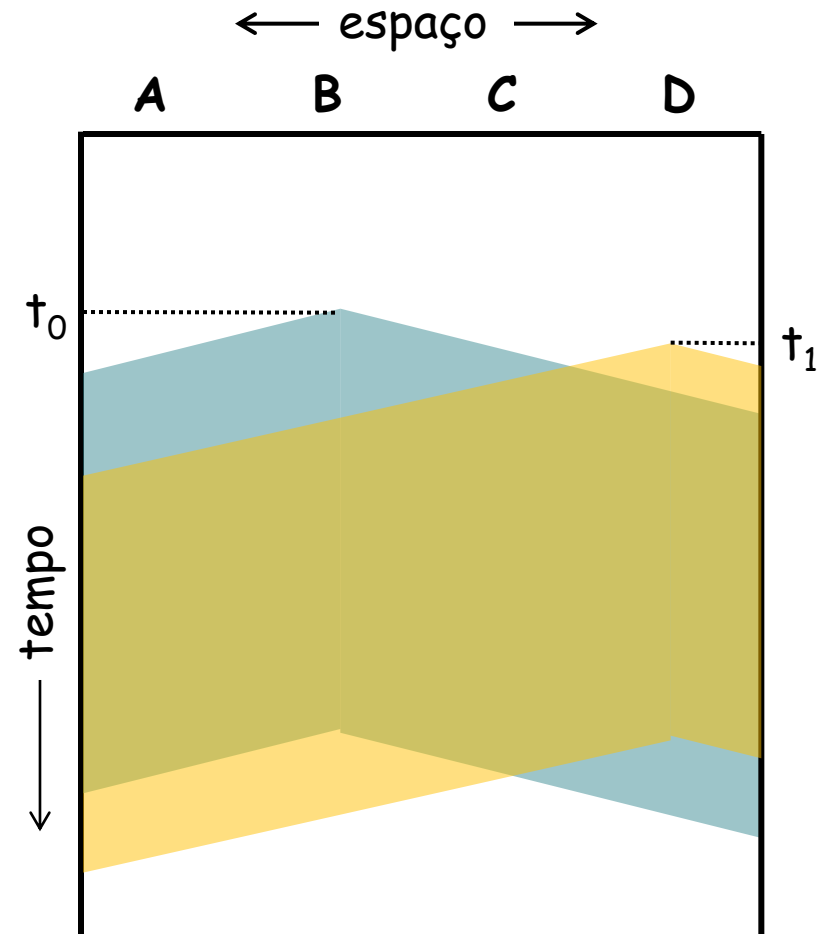
- Estação que quer transmitir um quadro ouve o meio
- Mesmo com a escuta da portadora, ainda podem ocorrer colisões
- Duas ou mais estações escutam o meio
 - Não escutam a transmissão da outra devido ao atraso de propagação do sinal



Colisão de Quadros

- Exemplo:
 - 4 estações: A, B, C e D
 - Em t_0 , B escuta o meio
 - Para B, o meio está livre
 - Em t_1 , D escuta o meio
 - Para D, o meio também está livre
 - Os bits enviados por B não chegaram a D

Colisão!



Colisão de Quadros

- Mesmo com a escuta da portadora, ainda podem ocorrer colisões...
 - Devido à "memória" do meio físico
 - Quanto maior o tamanho da rede
 - Maior o atraso de propagação de uma extremidade à outra
 - Maior a probabilidade de ocorrerem colisões
 - Quanto menor o tamanho da rede
 - Mais efetiva é a escuta de portadora
 - Explica o sucesso do CSMA para redes locais

Colisão de Quadros

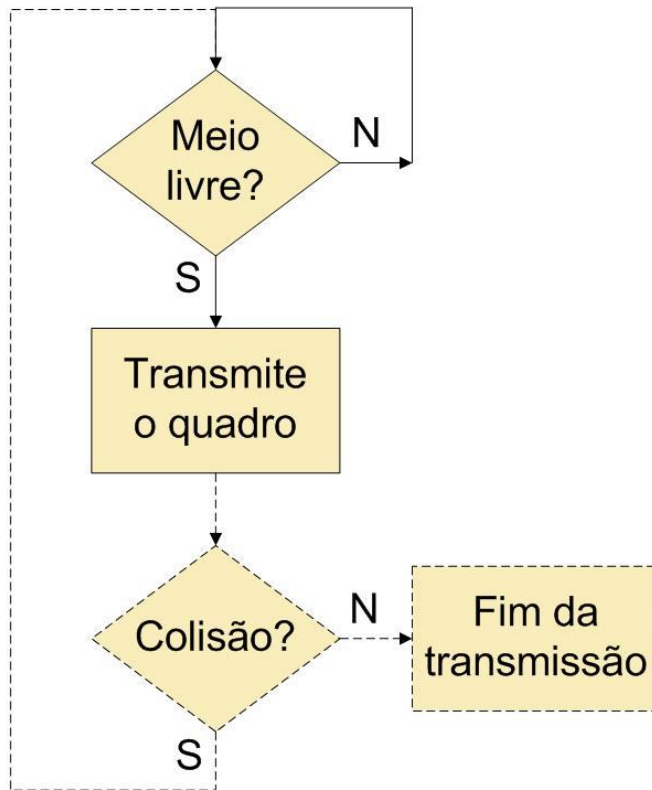
- **Inferida:** Através do não recebimento de um reconhecimento positivo em um tempo T
 - CSMA persistente, CSMA não-persistente e CSMA p-persistente
 - MACA (*Multiple Access with Collision Avoidance*)
 - MACAW (*Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless*)
 - FAMA (*Floor Acquisition Multiple Access*)
 - CSMA/CA (*Collision Avoidance*)
- **Detectada**
 - CSMA/CD (*Collision Detection*)

CSMA Persistente

- Quando a estação tem um quadro para transmitir...
 - Primeiro escuta o meio:
 - Se o meio estiver livre → Transmite
 - Se o meio estiver ocupado → Continua escutando o meio até que ele fique livre
- Se houver uma colisão
 - Espera um tempo aleatório para recomeçar o processo

CSMA Persistente

Retransmissão



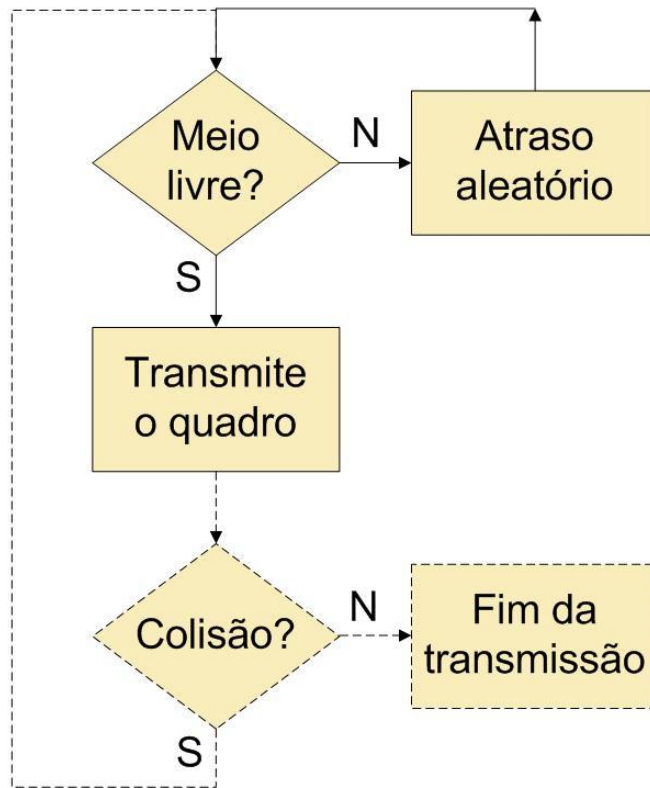
Pode haver nova colisão após o meio ficar livre!

CSMA Não-persistente

- Quando a estação tem um quadro para transmitir...
 - Primeiro escuta o meio:
 - Se o meio estiver livre → Transmite
 - Se o meio estiver ocupado → Estação espera um tempo aleatório e só depois volta a escutar o meio
 - Diferente do modo persistente, no qual a estação permanece escutando o meio até que ele fique livre
- Se houver uma colisão
 - Espera um tempo aleatório para recomeçar o processo

CSMA Não-persistente

Retransmissão



Evita colisão após o meio ficar livre...

Em compensação, possui um maior retardo de acesso ao meio devido ao atraso aleatório

CSMA p-persistente

- Tempo dividido em *slots*
 - Definição de *slot* diferente da usada no *Slotted Aloha*
 - Quadro em geral ocupa vários *slots*
 - *Slot* de $T_s \rightarrow$ tempo máximo de propagação
- Ideia
 - Probabilidade p de transmitir o quadro no início de um *slot*

CSMA p-persistente

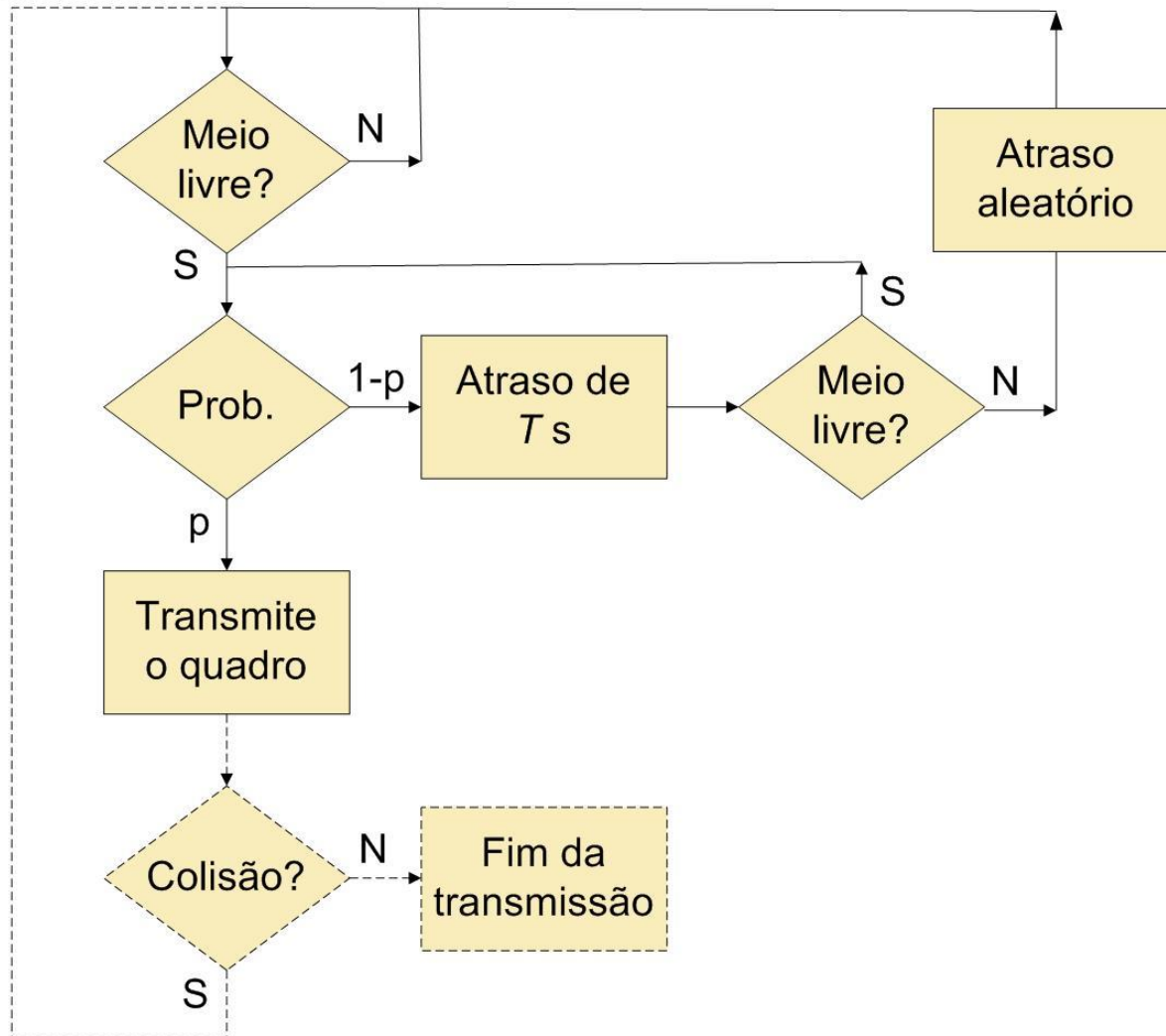
- Quando a estação tem um quadro para transmitir...
 - Primeiro escuta o meio:
 - Se o meio estiver livre
 - Estação transmite o quadro com probabilidade p
 - Espera pelo próximo *slot* com probabilidade $q = 1-p$
 - » Se o meio estiver livre, novo sorteio com probabilidade p
 - » Se o meio estiver ocupado, espera um tempo aleatório e reinicia o processo (Como se tivesse acontecido uma colisão)
 - Se o meio estiver ocupado → Espera até o próximo *slot* e repete o algoritmo

CSMA p-persistente

- Em caso de colisão após a transmissão...
 - Espera um tempo aleatório e o processo recomeça

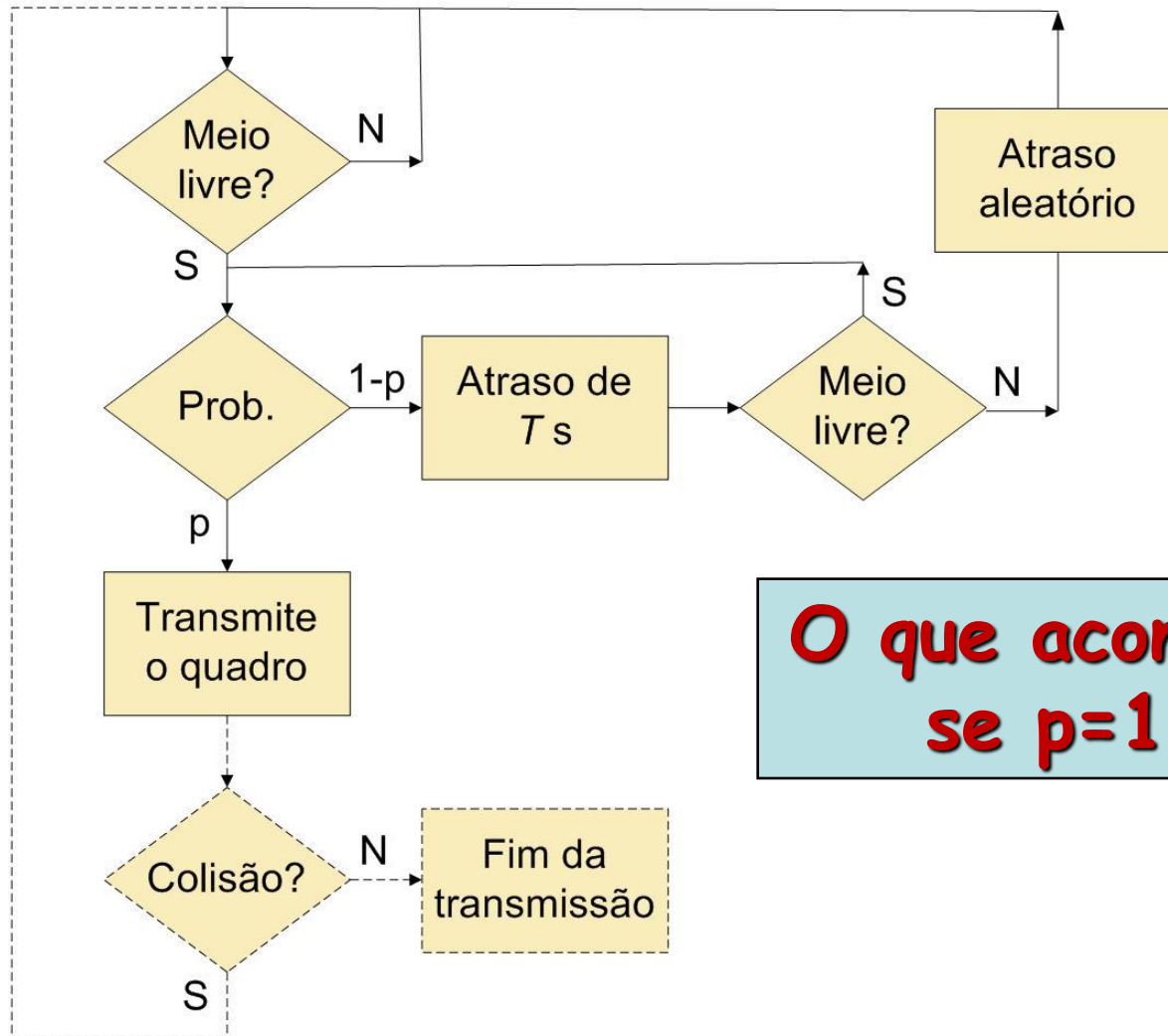
CSMA p-persistente

Retransmissão



CSMA p-persistente

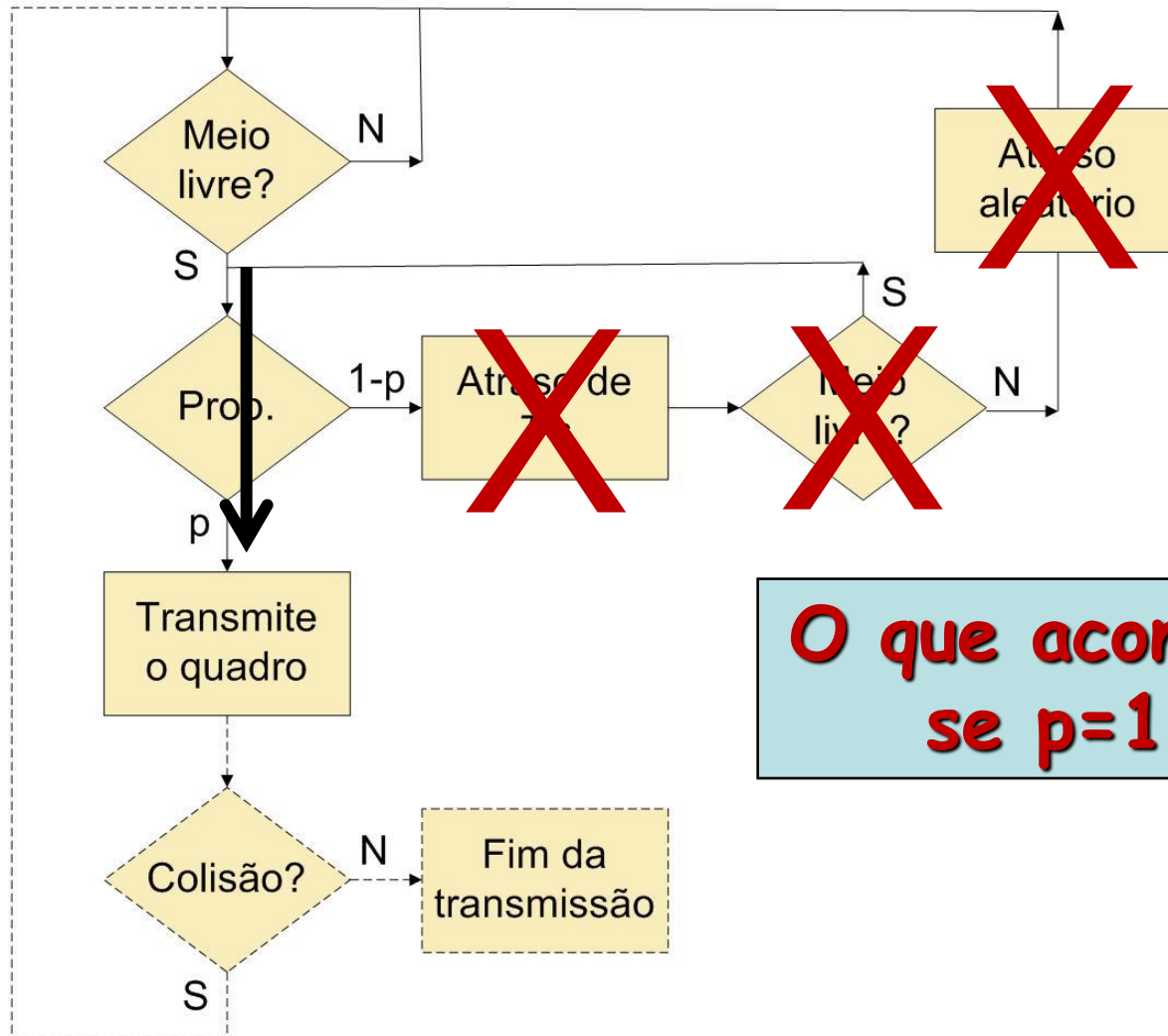
Retransmissão



O que acontece se $p=1$?

CSMA p-persistente

Retransmissão



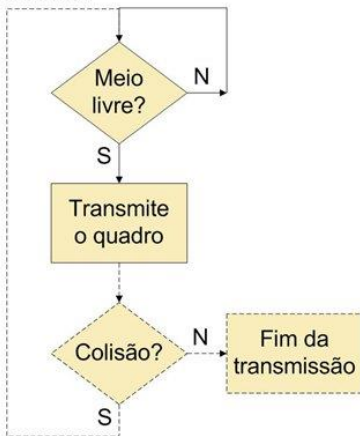
O que acontece se $p=1$?

CSMA p-persistente

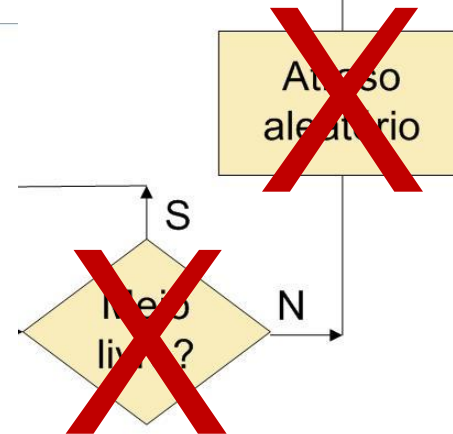
Retransmissão

CSMA Persistente

Retransmissão



Pode haver nova colisão após o meio ficar livre!



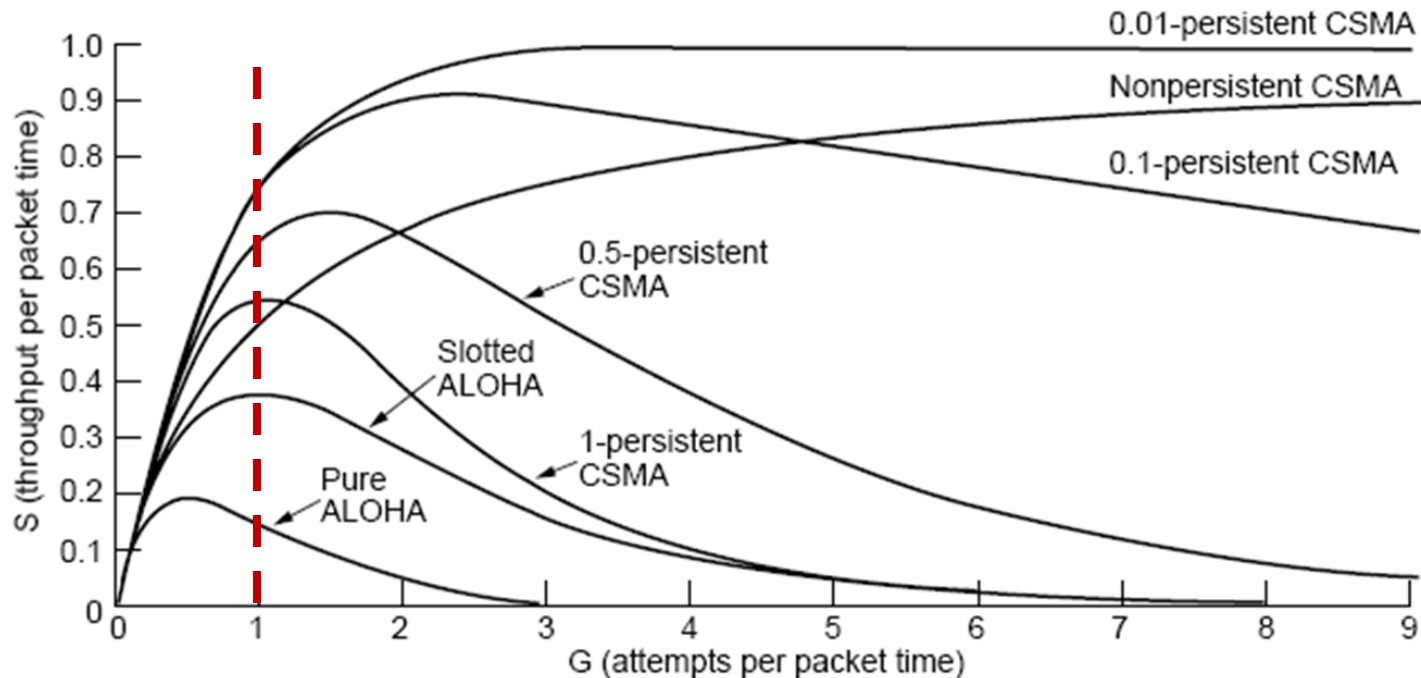
O que acontece se $p=1$?

transmissão

S

Eficiência

Utilização do canal x carga (fonte: Tanenbaum)



O eixo X descreve o número de nós que querem acessar o meio ao mesmo tempo, assumindo que o número total de nós na rede tende ao infinito.

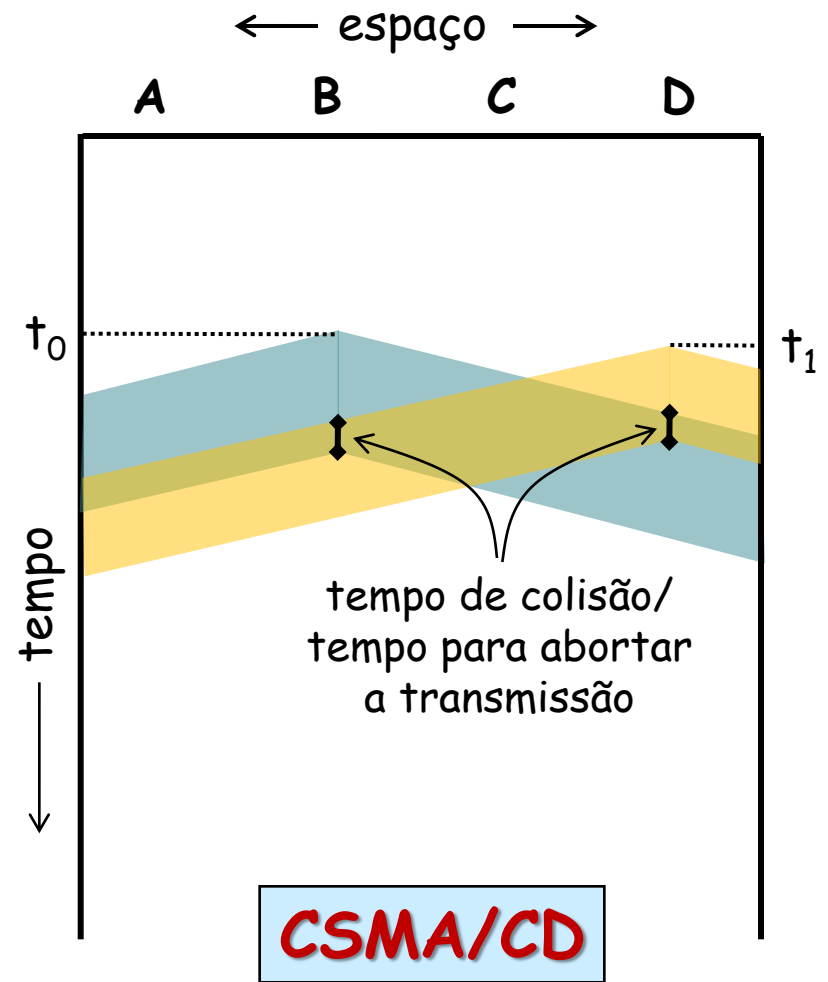
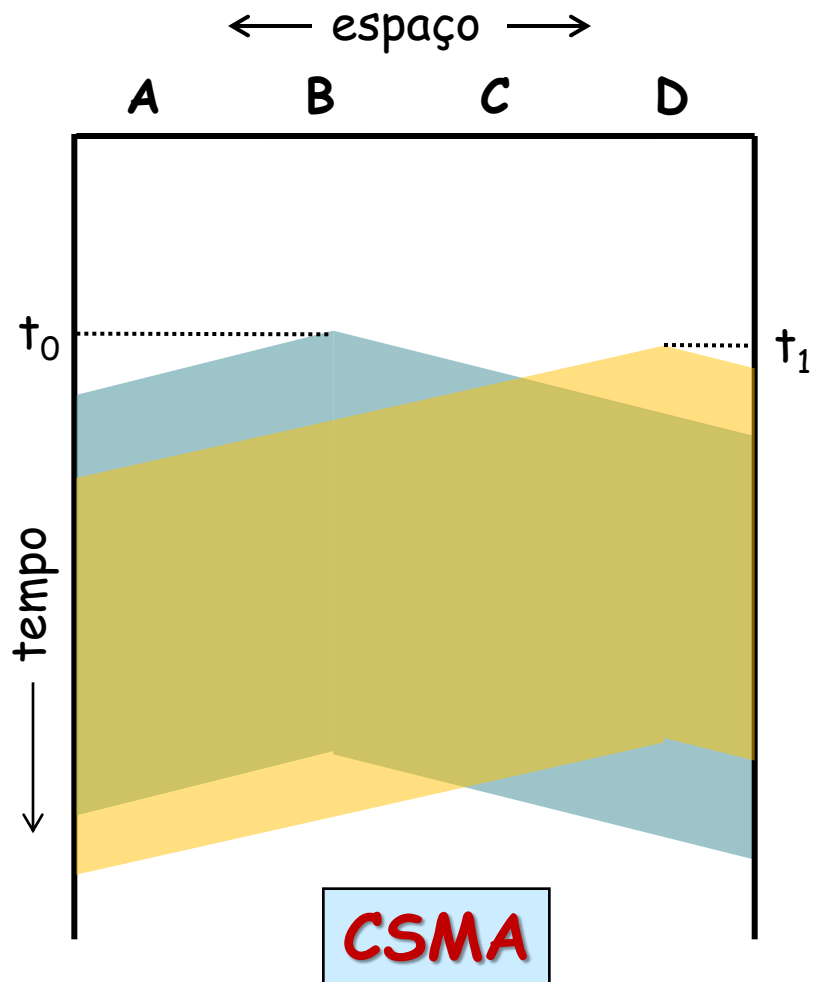
CSMA/CD

- Escuta de portadora
 - Como o CSMA persistente
- Detecção de colisão
 - Realizada pelo transmissor durante a transmissão do quadro
 - Transmissor escuta o meio enquanto transmite
 - Estação cancela a transmissão assim que detecta a colisão
 - Reduz o desperdício!

CSMA/CD

- Caso haja colisão...
 - Nova tentativa de transmissão após um tempo aleatório
 - Semelhante ao CSMA p-persistente
- Analogia humana: bate papo educado!
- Detecção de colisões
 - Fácil em redes locais cabeadas
 - Mede a potência do sinal, comparando o sinal recebido com o transmitido
 - Difícil em redes locais sem fio
 - O receptor é desligado durante a transmissão

CSMA Vs. CSMA/CD

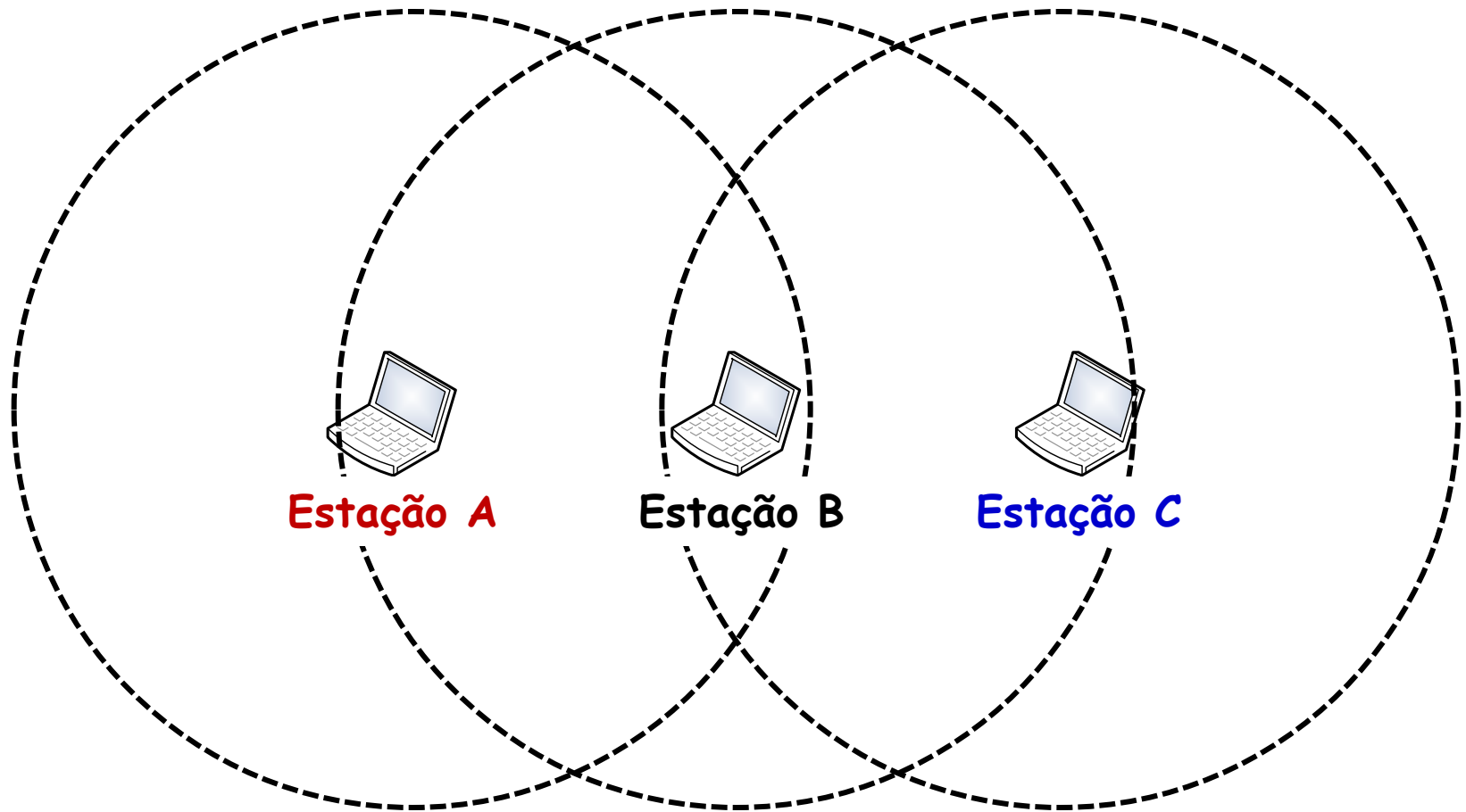


Por que o CSMA/CD não é Usado em Redes Sem Fio?

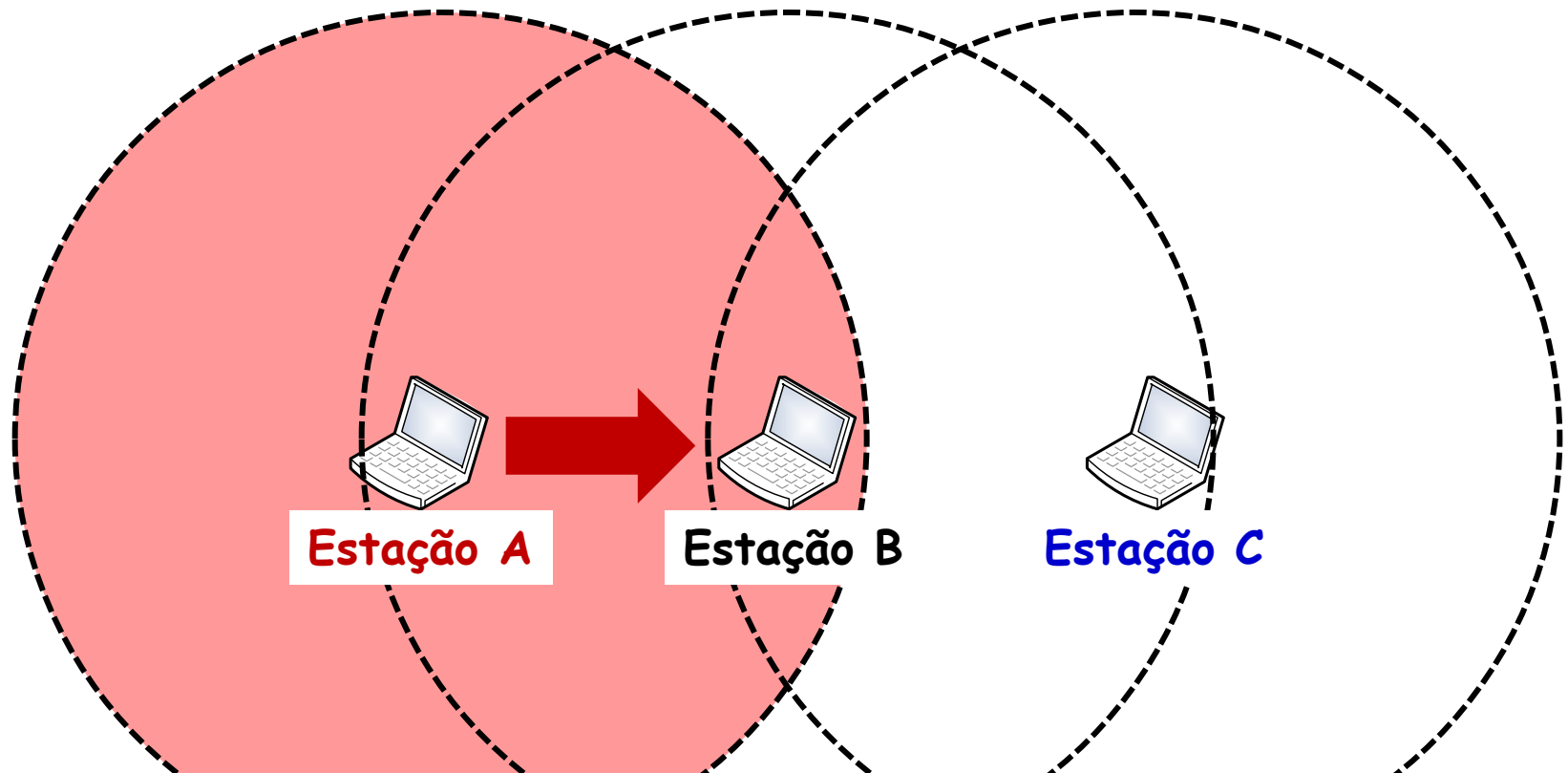
Por que o CSMA/CD não é Usado em Redes Sem Fio?

- Grande diferença de potência entre transmissor e receptor
 - Atenuação não permite que todos os nós escutem a transmissão uns dos outros
 - Separação entre sinal e ruído é difícil e a escuta de portadora não é suficiente para evitar colisões
 - Problema do terminal escondido e do terminal exposto
 - Escuta de portadora é feita no transmissor e não no receptor

Problema Terminal Escondido

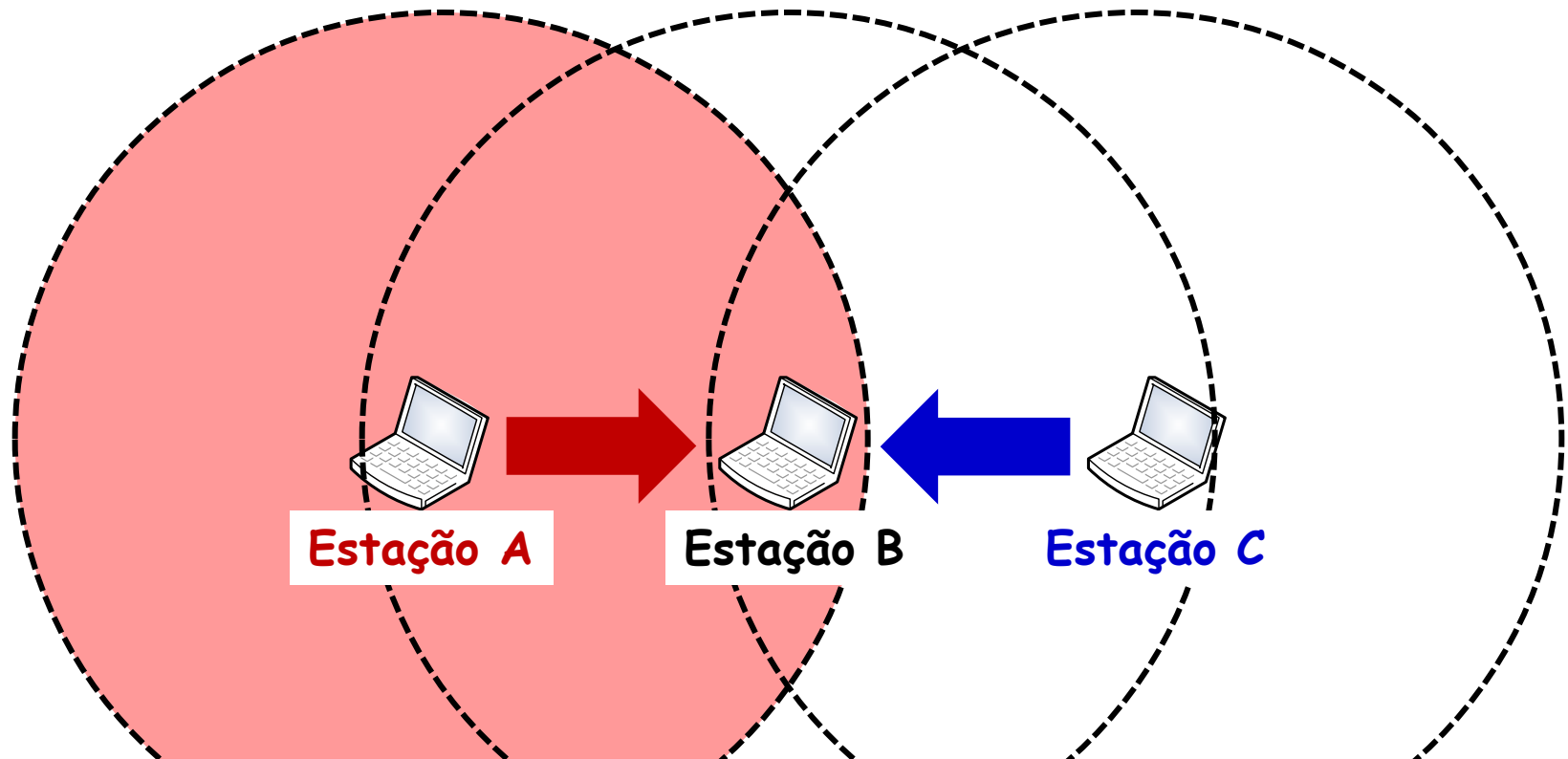


Problema Terminal Escondido



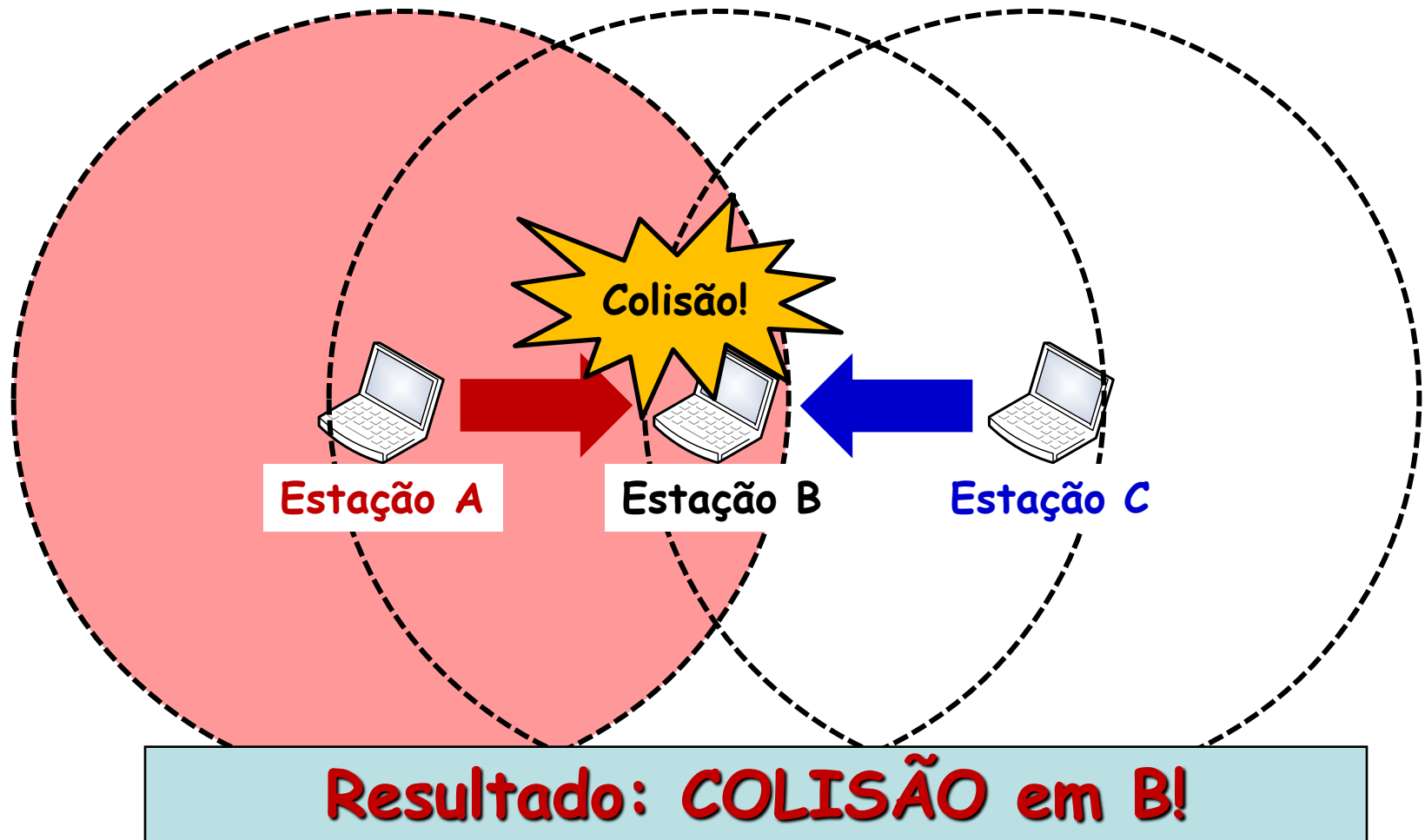
Caso A queira falar com B, apenas as estações vizinhas de A escutarão o meio ocupado...

Problema Terminal Escondido

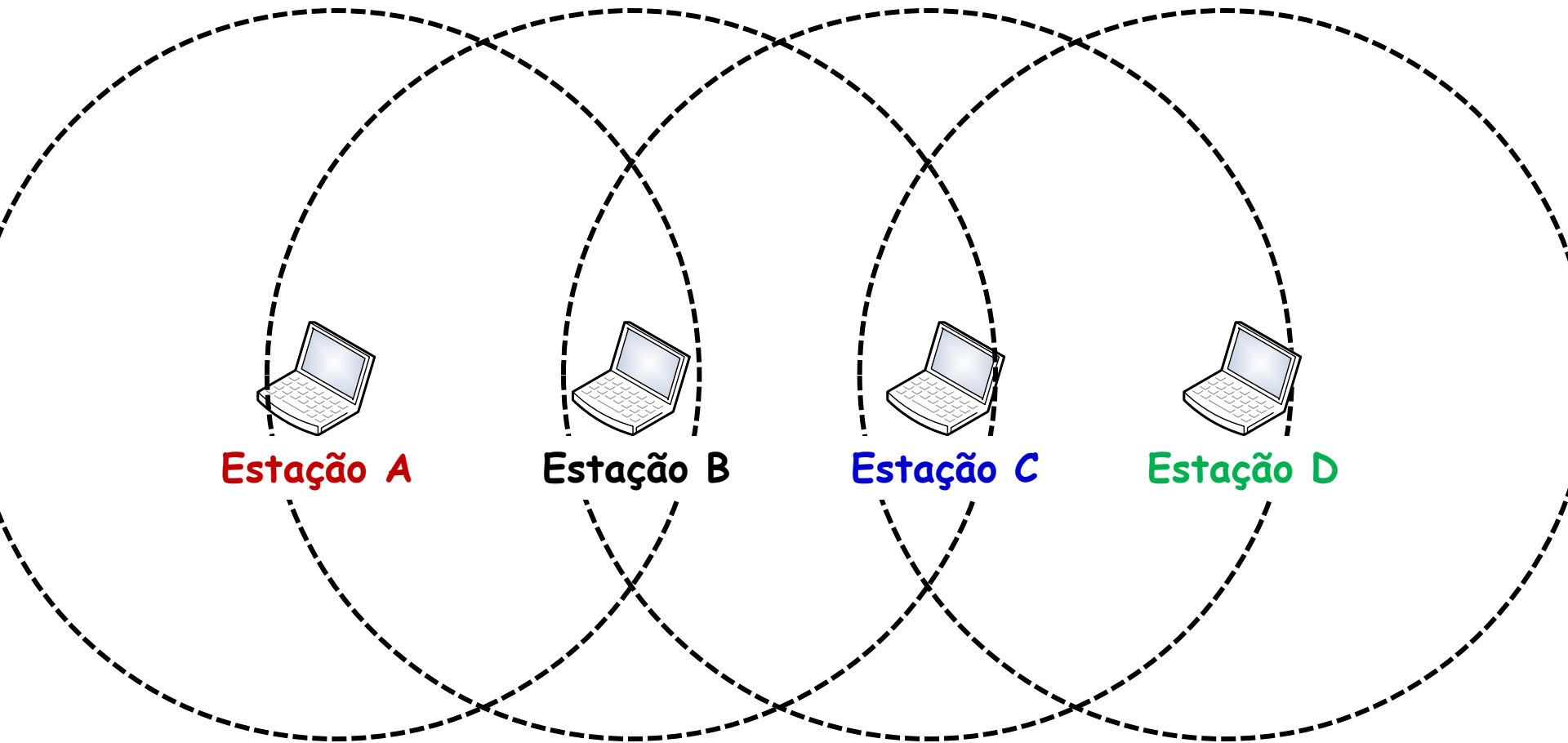


Caso C queira falar com B também, ele poderá ir em frente pois para ele o meio estará livre...

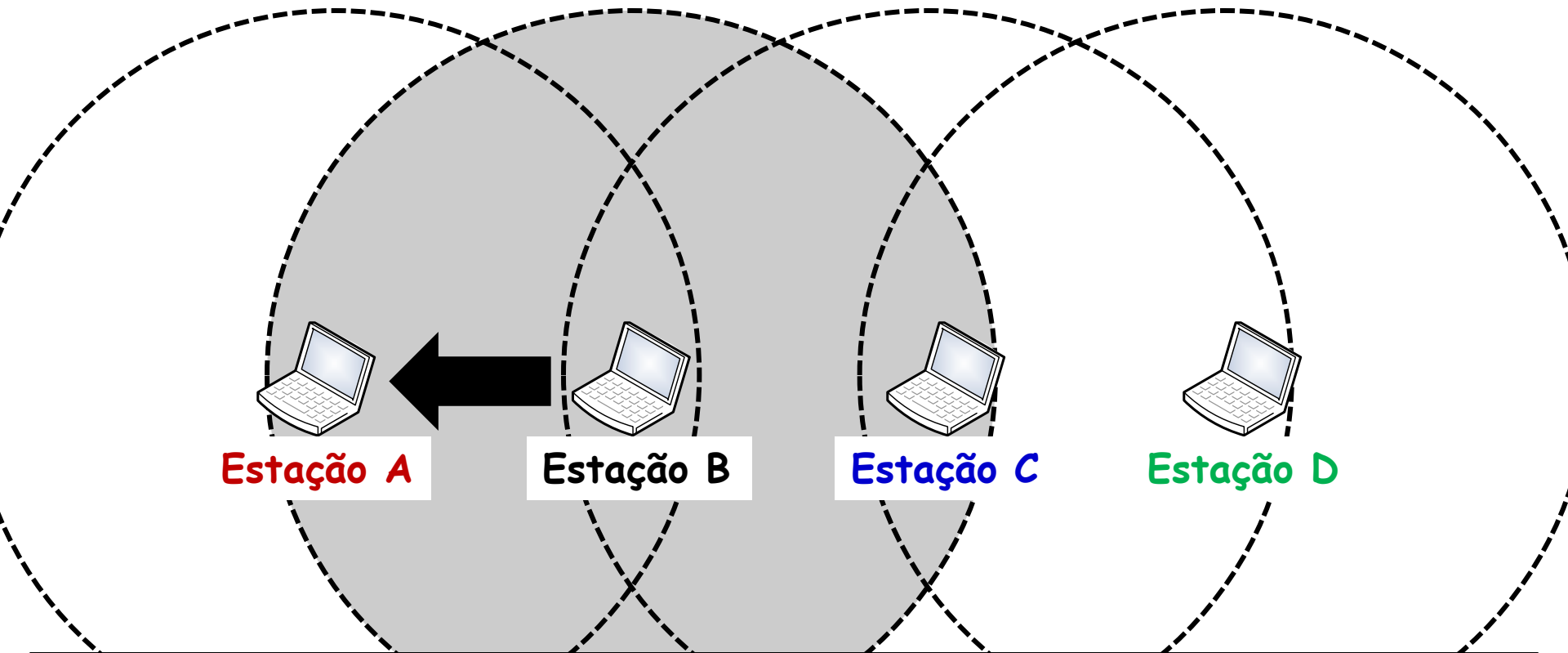
Problema Terminal Escondido



Problema Terminal Exposto

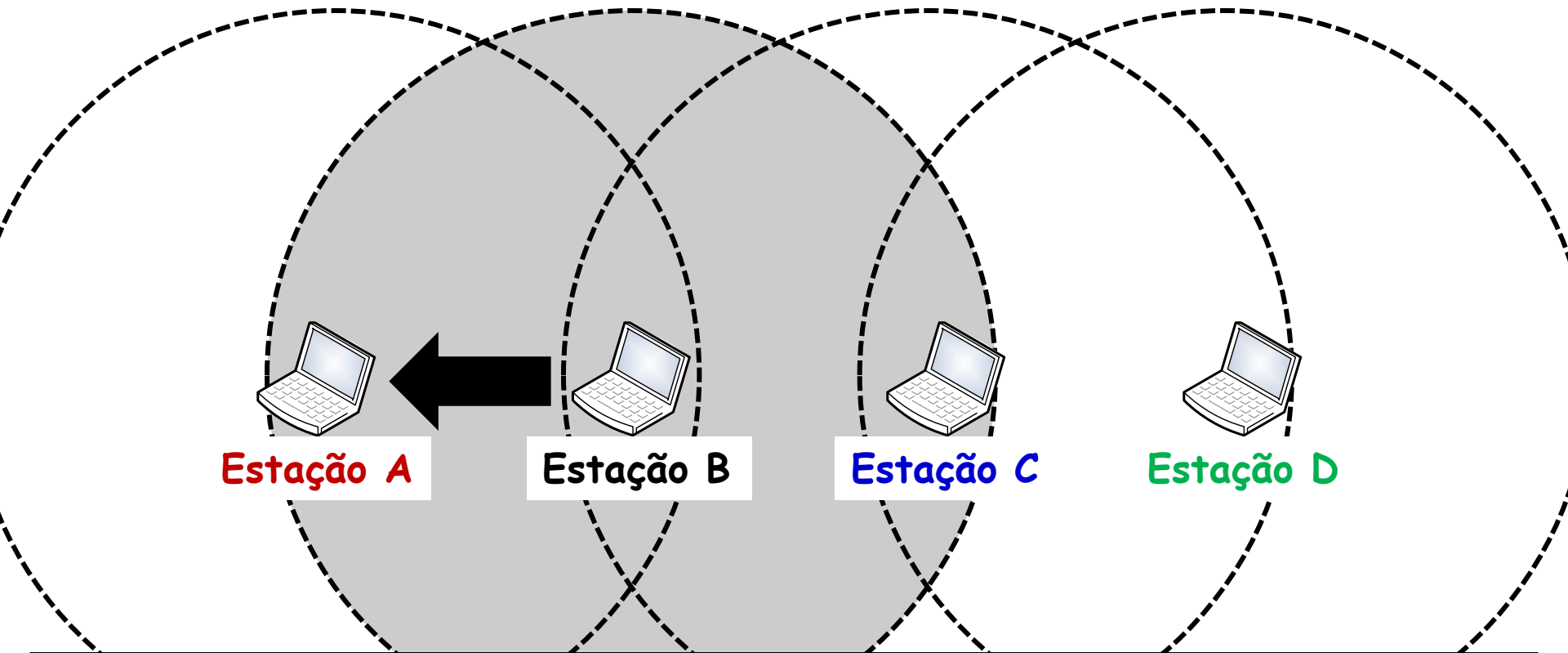


Problema Terminal Exposto



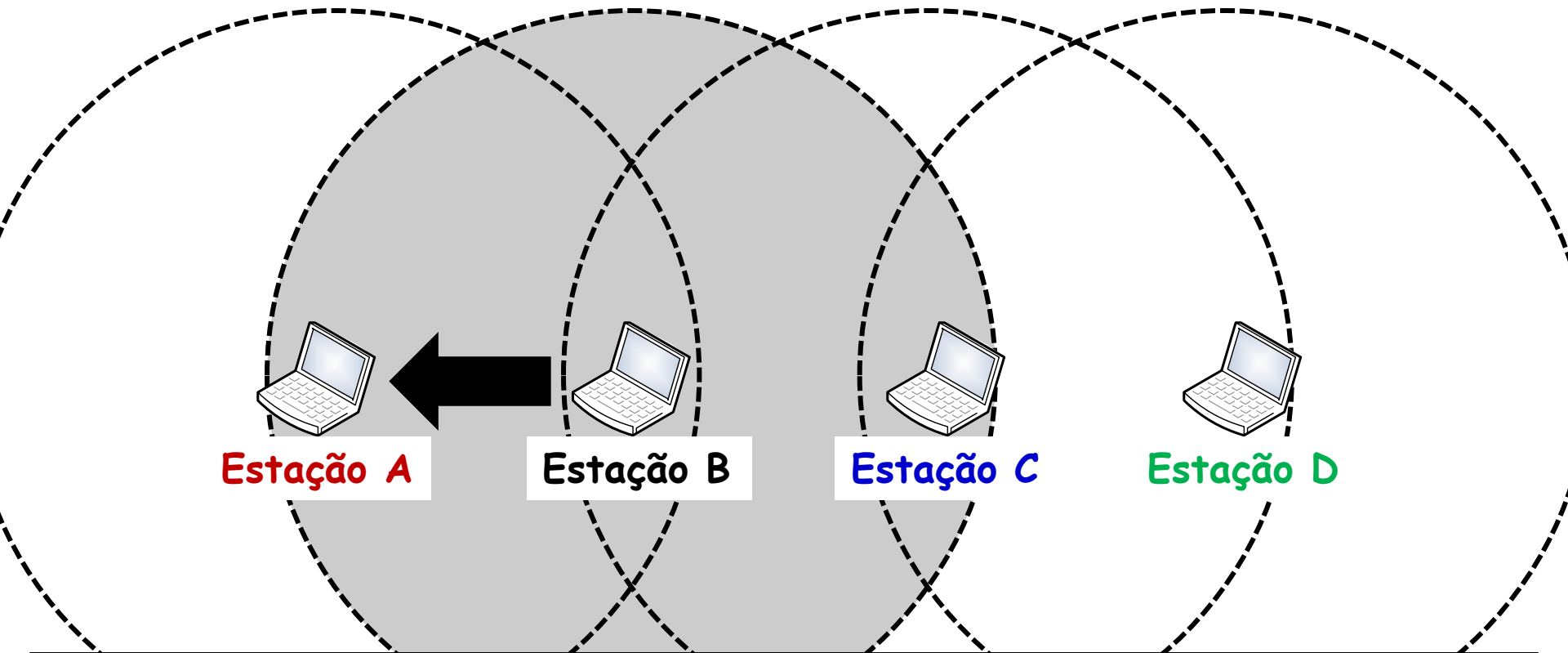
Caso B queira falar com A, todas as estações vizinhas de B escutarão o meio ocupado...

Problema Terminal Exposto



Isso significa que C também não pode acessar o meio... Mas será que teria problema se C quisesse falar com D?

Problema Terminal Exposto



Resposta: NÃO... Porém, C está exposta à B e a transmissão $C \rightarrow D$ não ocorre enquanto o meio estiver ocupado por B.

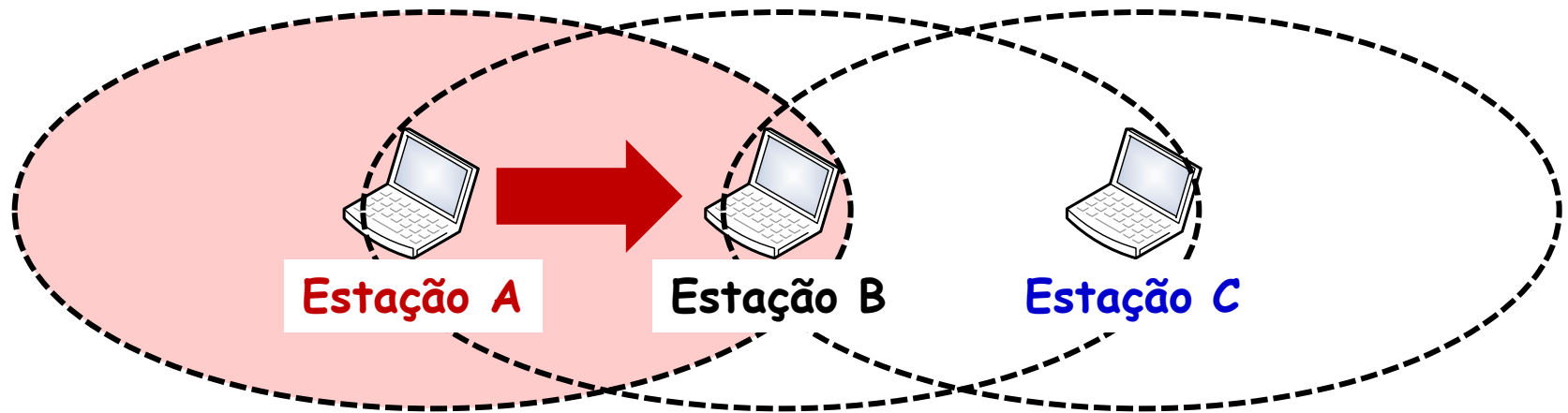
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)

- Não escuta o meio
 - Assume que a contenção faz sentido apenas no receptor
 - Escuta do meio por parte do transmissor é ineficiente pois as colisões são no receptor
- Realiza reserva do meio tanto no transmissor quanto no receptor
 - Usa quadros de sinalização pequenos e de tamanho fixo
 - RTS (*Request-To-Send*): requisição do transmissor
 - CTS (*Clear-To-Send*): confirmação do receptor

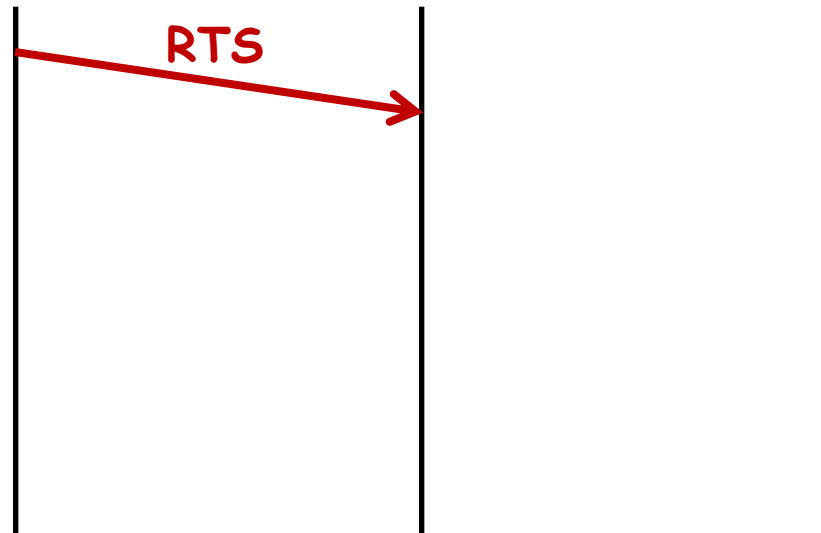
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)

- RTS (*Request-To-Send*)
 - Reserva o meio por tempo suficiente até que o CTS seja recebido + uma folga
 - **Evita colisões no transmissor**
- CTS (*Clear-To-Send*): confirmação do receptor
 - Reserva o meio por tempo suficiente até que os dados sejam transmitidos
 - **Evita colisões no receptor**

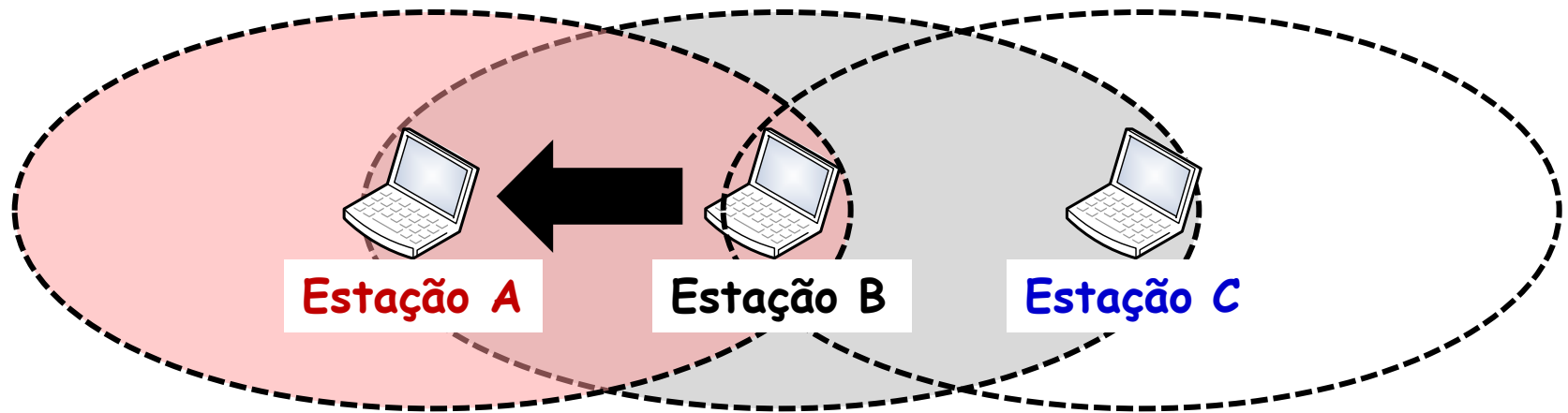
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



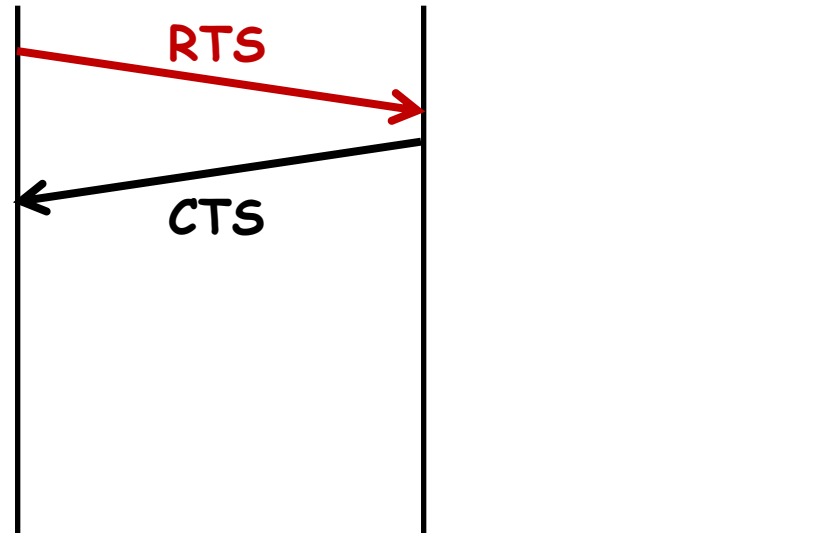
Nenhum
vizinho de A
pode
transmitir até
que A receba
o CTS...



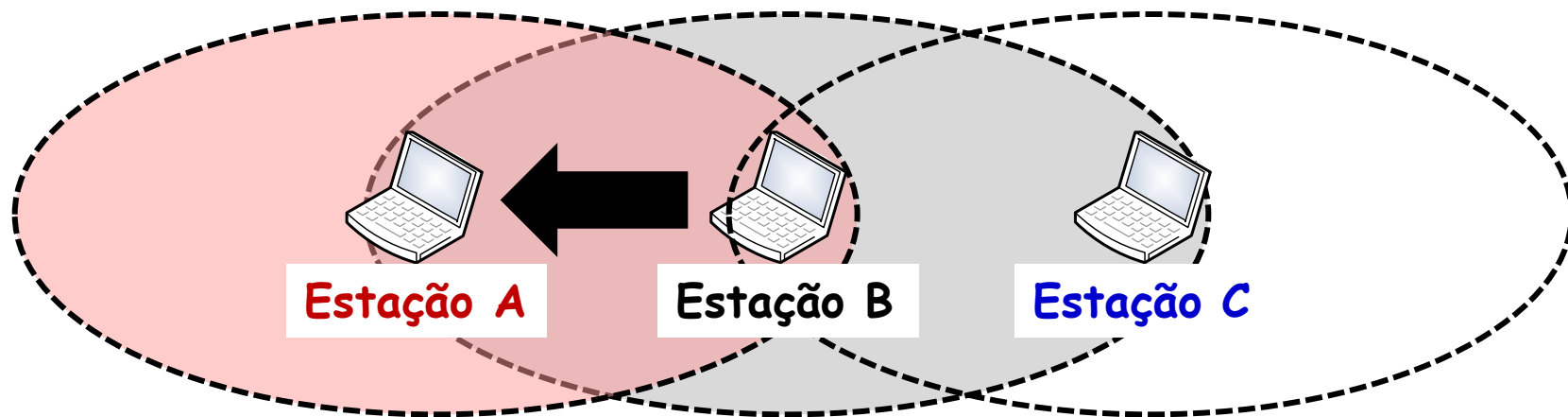
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



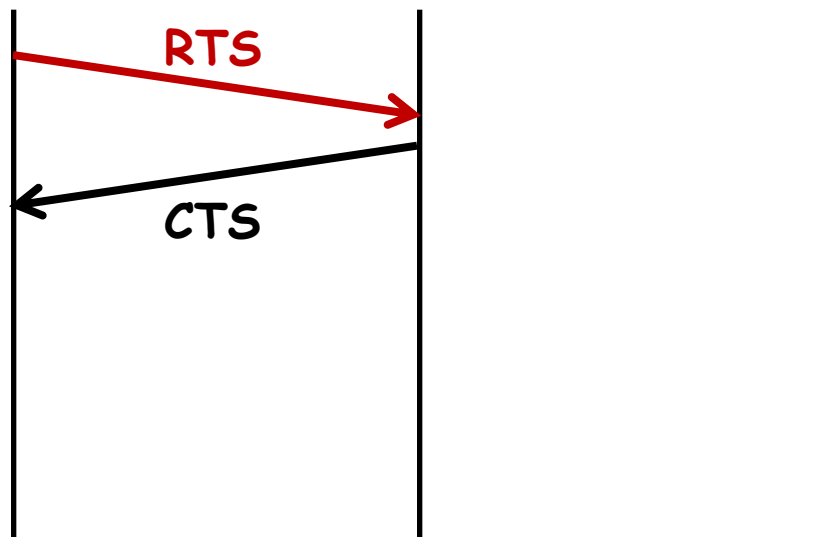
Nenhum vizinho de B pode transmitir até que B receba os dados...



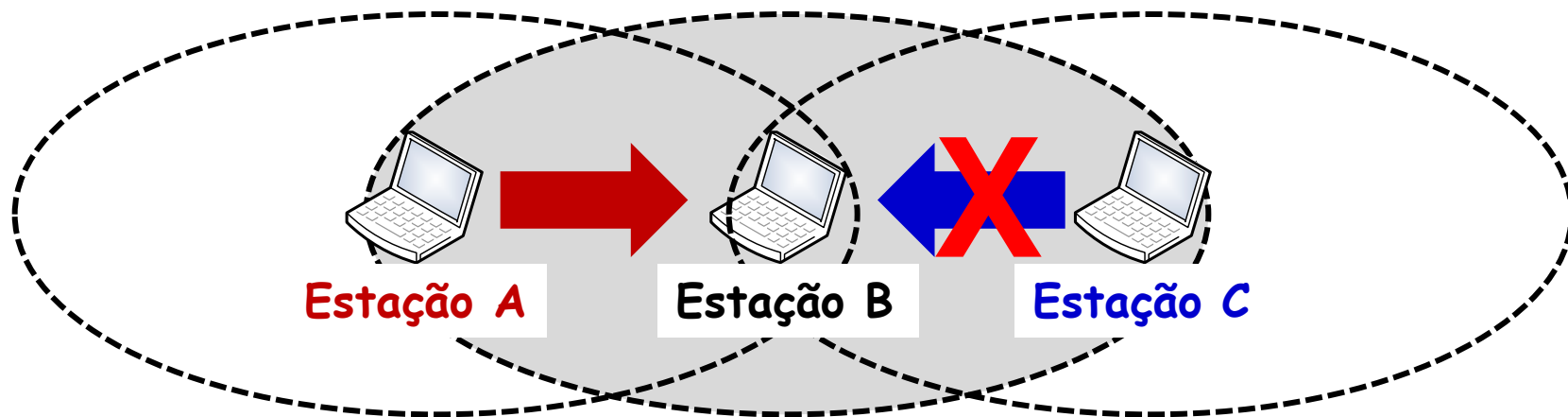
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



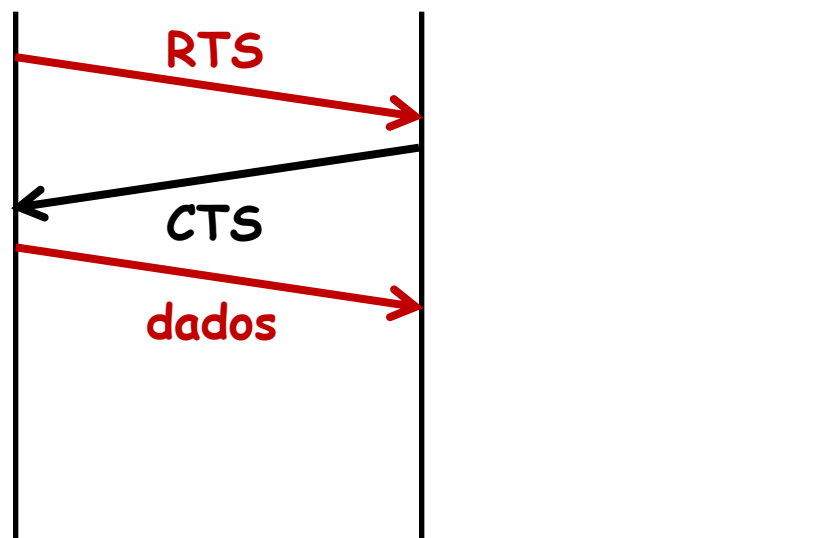
Resolve o problema do terminal escondido



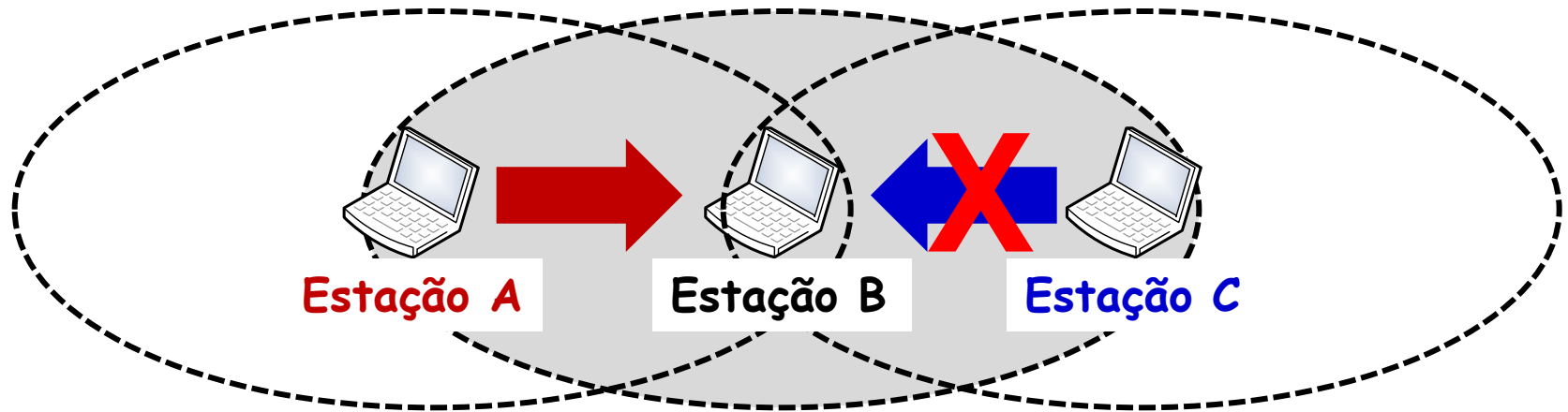
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



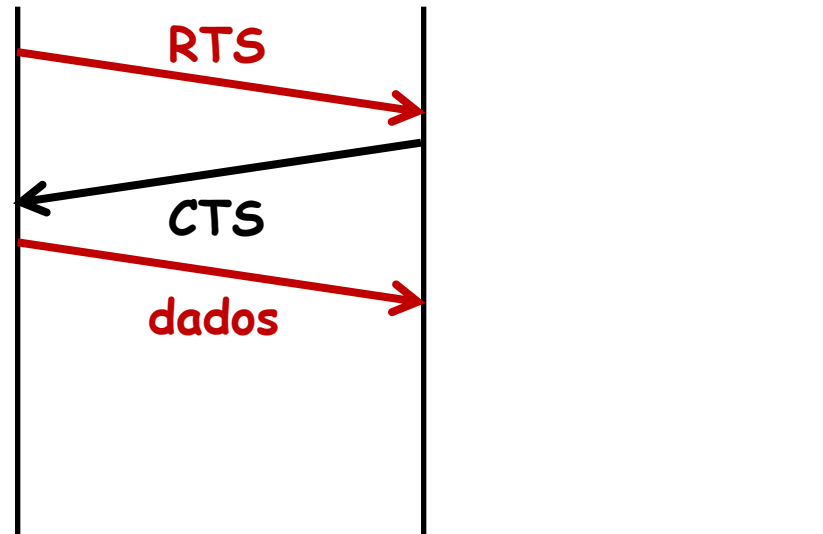
Como a colisão é problema no receptor, basta o meio ficar reservado em B



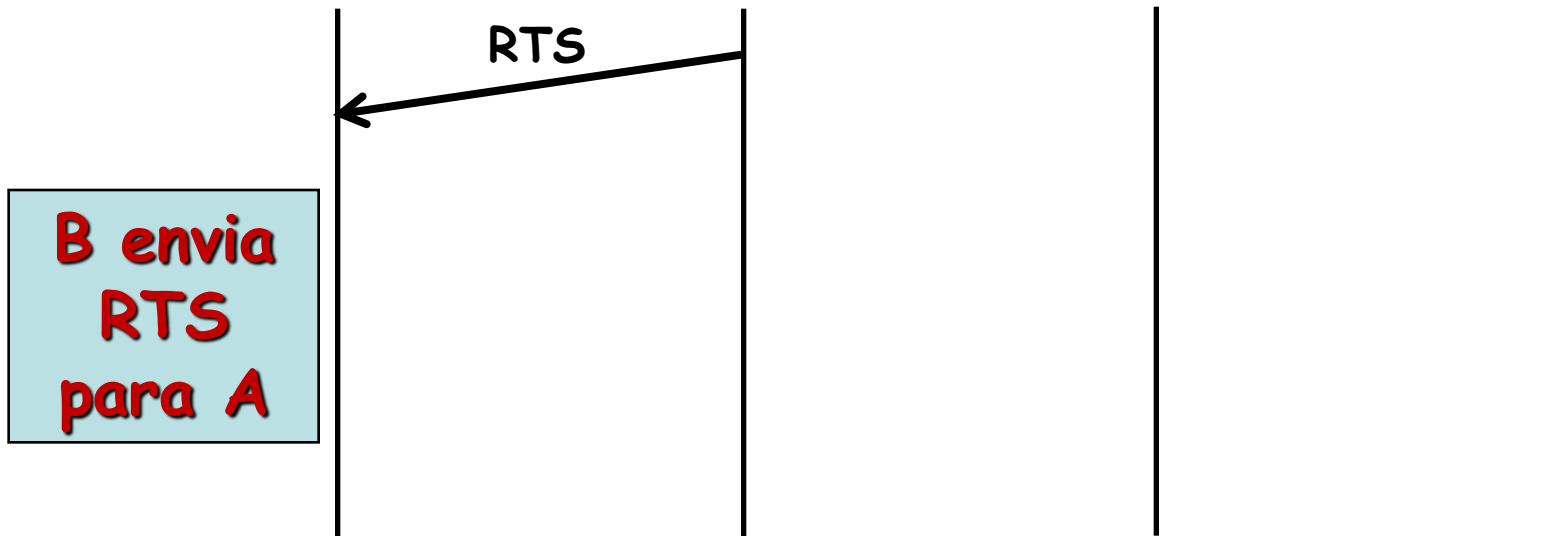
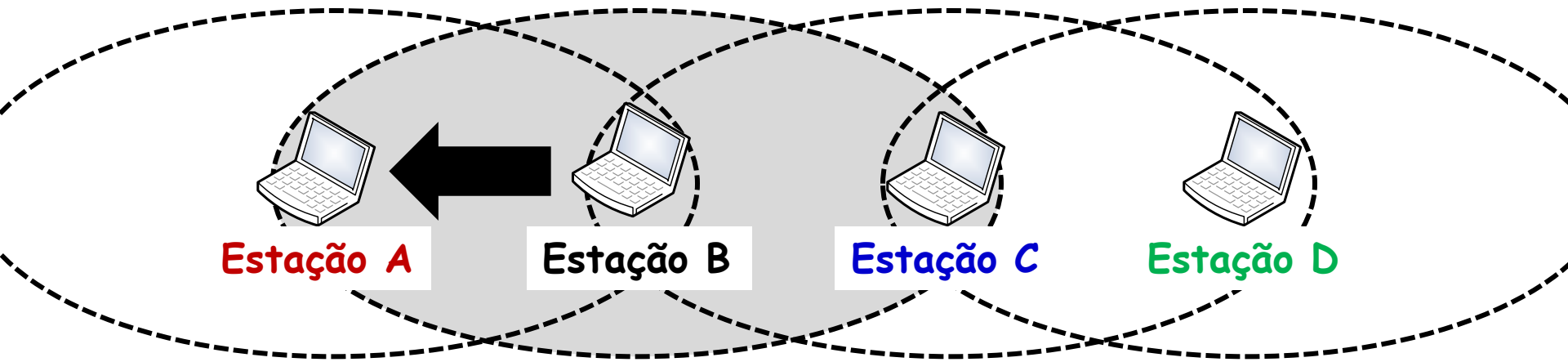
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



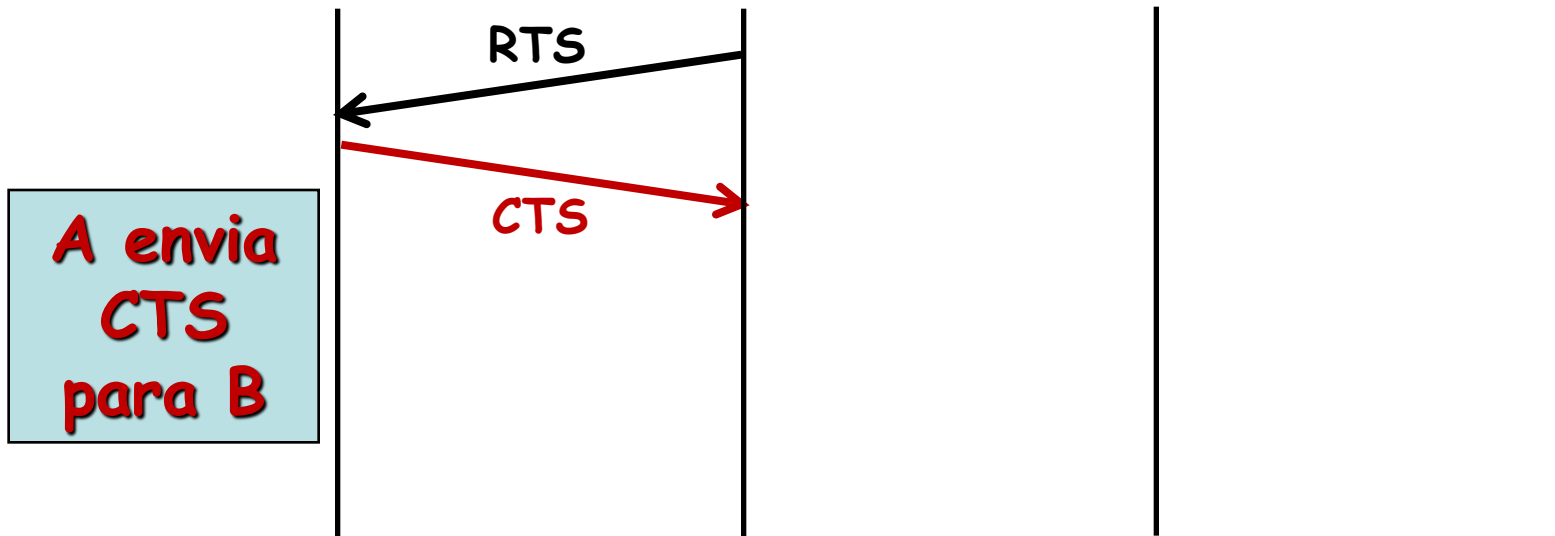
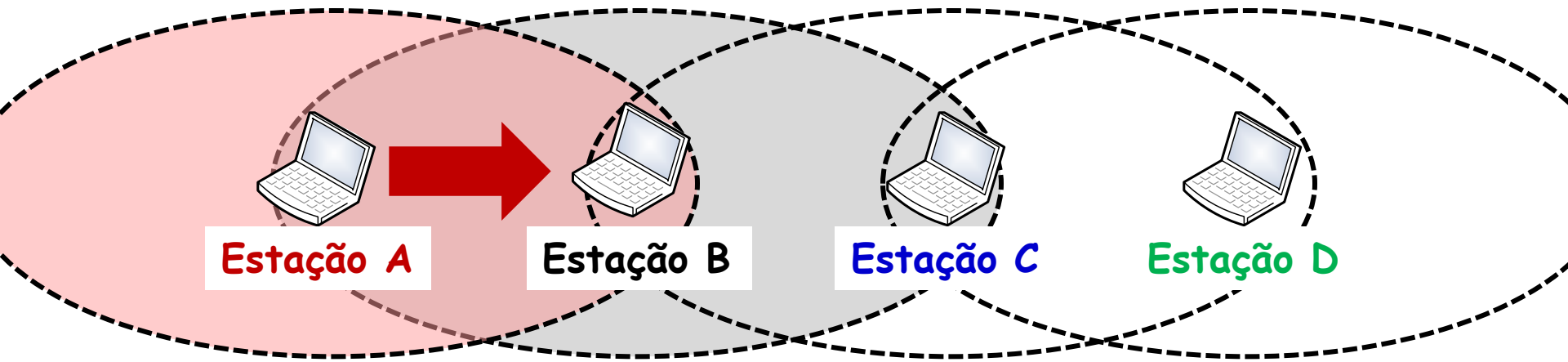
Isso resolve o problema do terminal exposto?



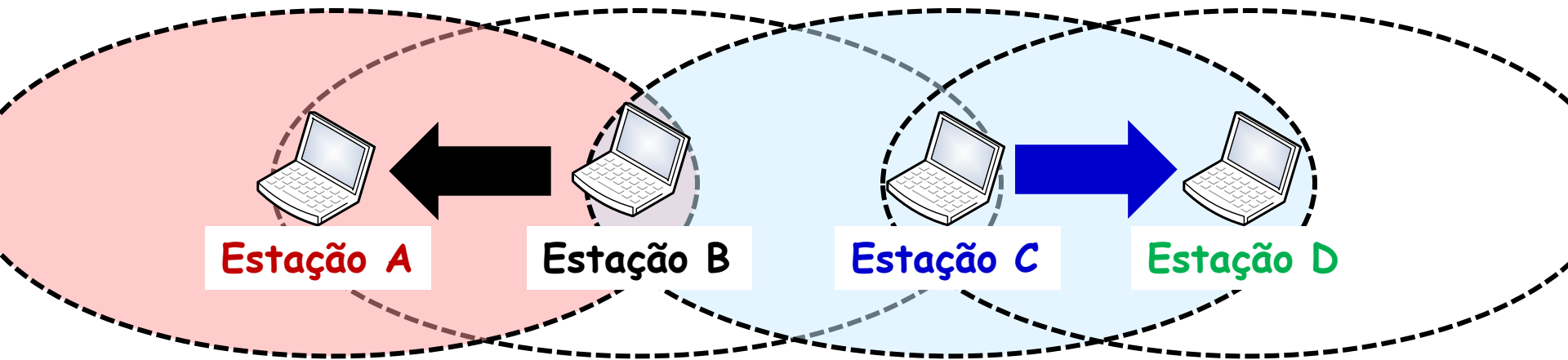
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



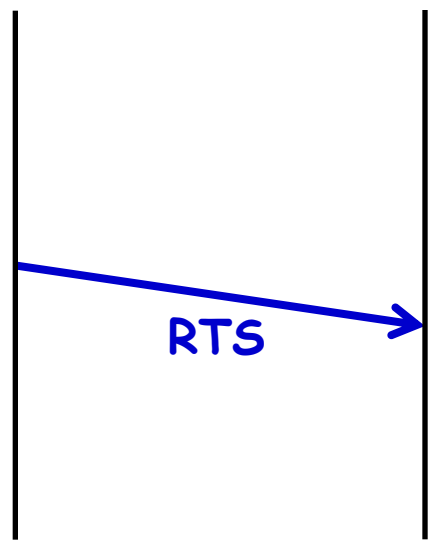
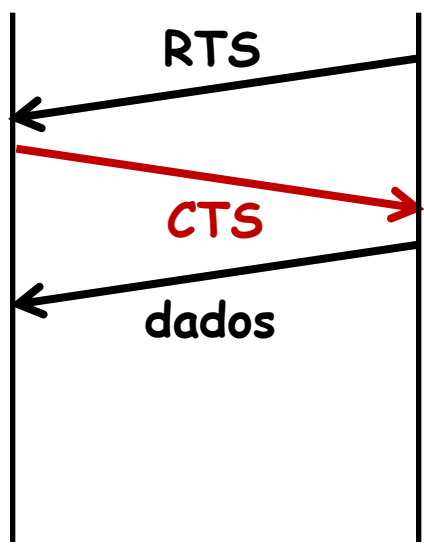
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



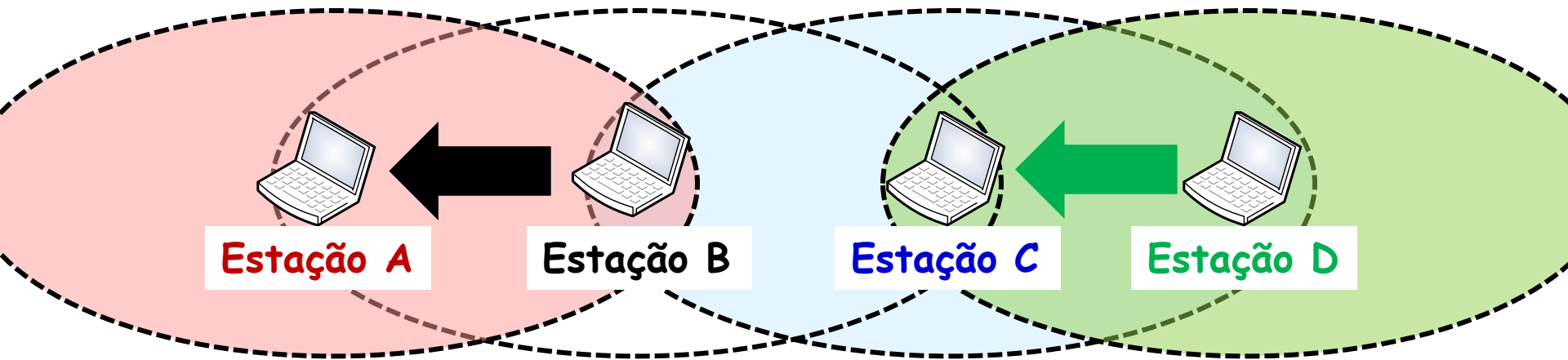
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



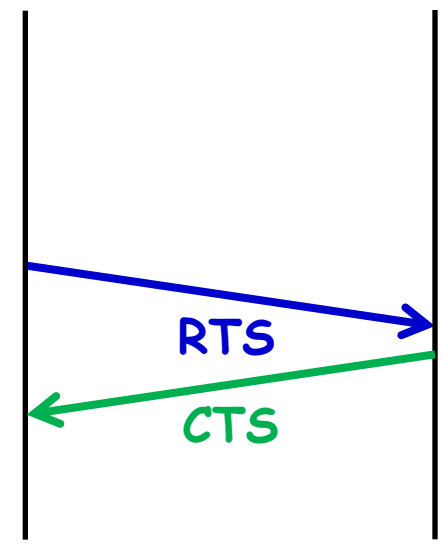
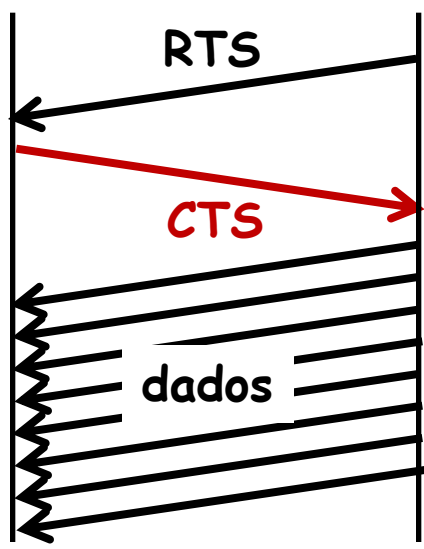
B envia dados para A e C pode enviar RTS para D



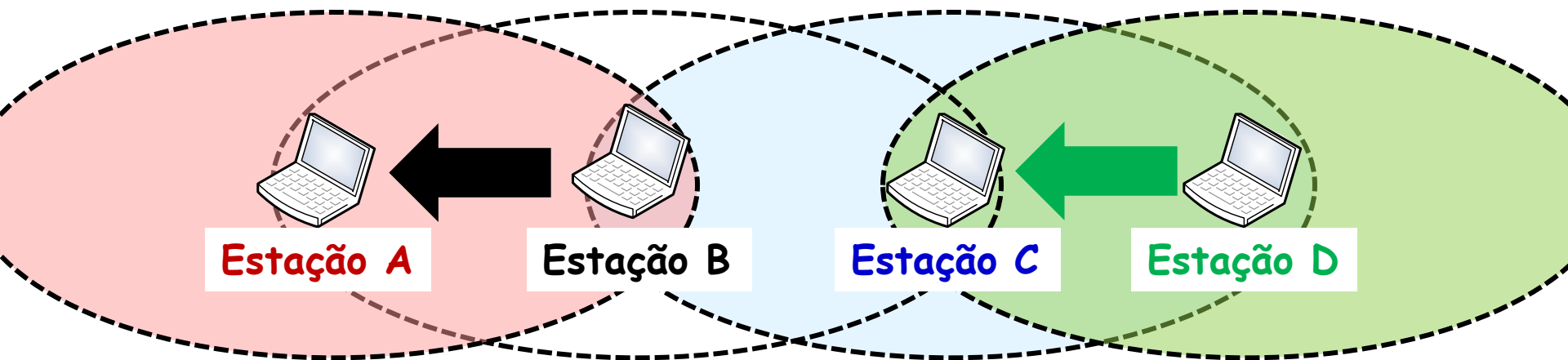
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



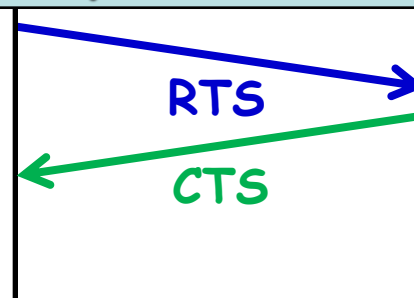
B envia dados para A e D pode enviar CTS para C



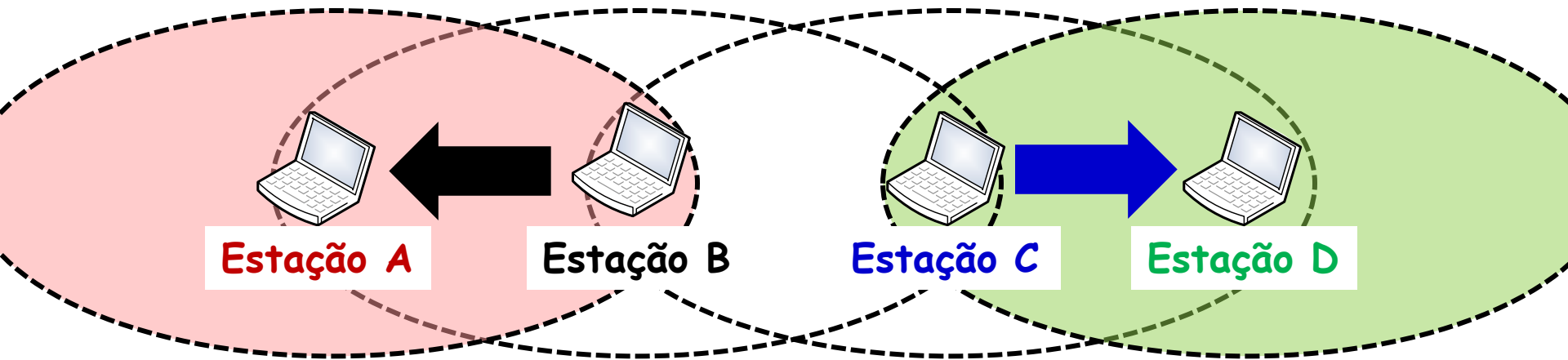
MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



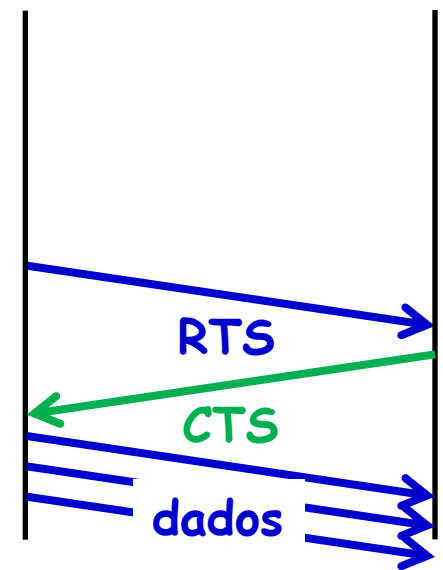
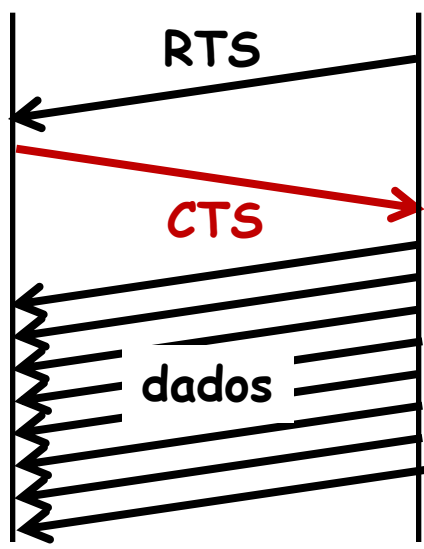
**A Estação C pode não receber o CTS pois este pode colidir com os dados enviados B...
Nesse caso, o C reenviará o RTS posteriormente**



MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)



Caso C
receba o
CTS de
D, B e A
podem
enviar
dados...



MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)

- Caso uma colisão aconteça (colisão de RTS)
 - Estação espera um intervalo de tempo = $b \cdot \text{tempo_slot}$
 - b é um inteiro em $[0, CW]$
 - CW é chamado de contador de *backoff* e o valor é ajustado dependendo do número de colisões
 - $CW = \min(2 \cdot CW, CW_{\max})$, onde $CW_{\max} = 64$
 - Sempre que uma transmissão bem sucedida acontecer...
 - $CW = CW_{\min} = 2$ (depende do valor mínimo)

Esse mecanismo é chamado de *backoff* exponencial binário

MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)

- Falhas de transmissão só podem ocorrer em caso de colisões de RTS
 - Retransmissão do RTS caso um CTS não seja recebido
- Falhas de transmissão não ocorrem durante a transmissão de dados
 - Não há transmissão de ACK para dados
 - Premissa pouco realista, apesar do autor do MACA admitir que: **alcance de interferência > alcance de comunicação**

MACAW (MACA for Wireless LANs)

- Parte de 4 premissas:
 - Assim como o MACA não escuta o meio
 - Assume que a contenção faz sentido apenas no receptor e que a escuta do meio pelo transmissor é ineficiente
 - Assume que congestionamentos são dependentes da posição geográfica
 - Assume que informações de congestionamento devem ser divulgadas pela rede toda por questões de justiça de acesso
 - Assume que os nós devem propagar informações de sincronismo sobre períodos de contenção para contenção mais eficiente

MACAW (MACA for Wireless LANs)

- Modificações em relação ao MACA
 - Cada quadro insere o valor de seu contador de backoff
 - Nós podem ajustar o seu contador da mesma forma para evitar ganhos sucessivos do meio pelo mesmo nó
 - Contador de backoff é ajustado de forma diferente para evitar oscilações rápidas em seu valor
 - Sucesso: $CW = \max(CW - 1, CW_{\min})$
 - Colisão: $CW = \min(1,5 * CW, CW_{\max})$

**Preocupação maior é com a justiça do acesso ao meio:
Uma estação que acabou de acessar o meio não deve ser capaz de fazê-lo repetidas vezes.**

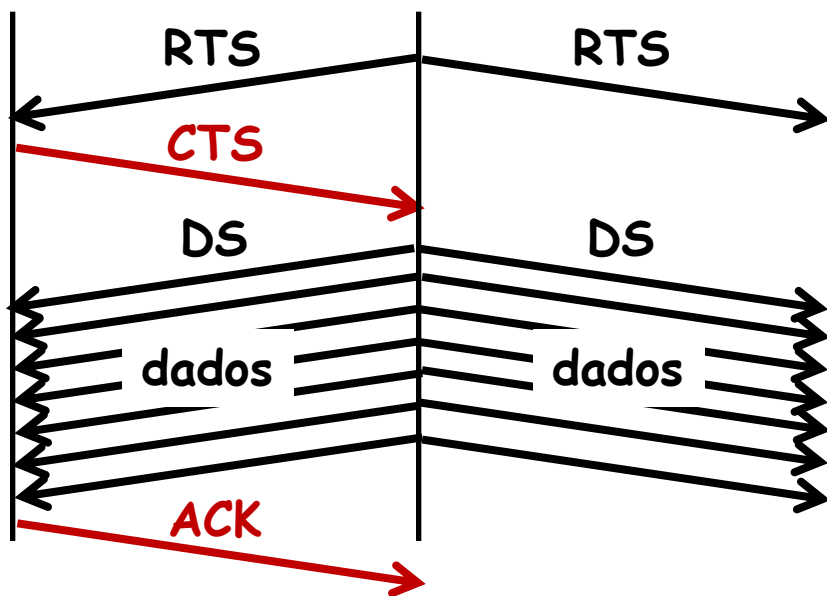
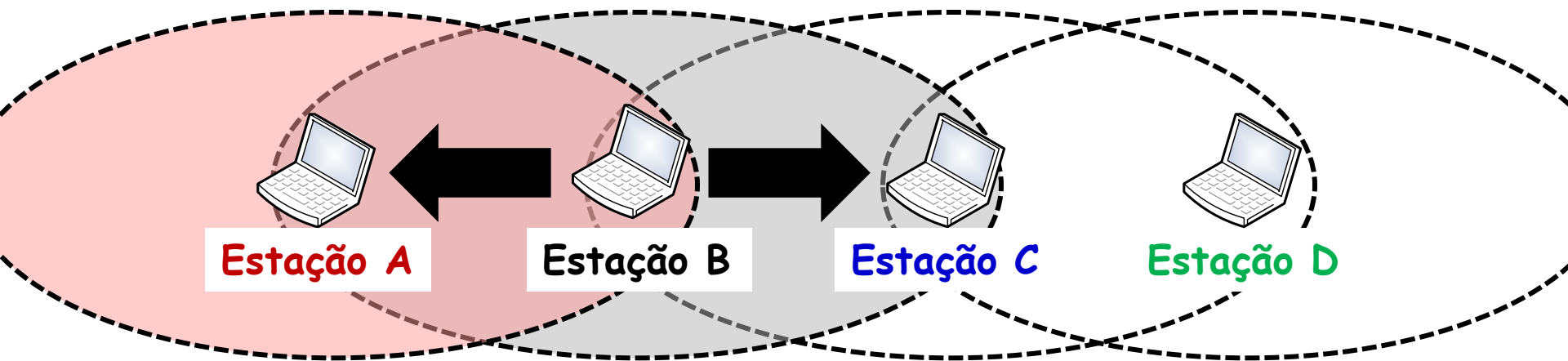
MACAW: Modificações em Relação ao MACA

- (Re)Introduz reconhecimento positivo (ACK)
 - MACA deixa a recuperação de pacotes de dados para camadas superiores
 - Estratégia mais lenta...
 - ACK pode não ser recebido pelo transmissor
 - Se o pacote de dados foi perdido:
 - Retransmissão dos dados é agendada, mas um RTS é retransmitido antes
 - Se o ACK foi perdido mas o pacote de dados foi bem recebido:
 - Retransmissão do RTS é respondida com ACK perdido ao invés do CTS

MACAW: Modificações em Relação ao MACA

- Problema do terminal exposto **retorna!**
 - Transmissões só podem ocorrer do nó exposto após o recebimento do ACK
- Problema da impossibilidade da recepção do CTS
 - Introdução da mensagem DS (Data Sending)
 - Informa o tempo necessário para a transmissão de todos os dados e mais a recepção do ACK
 - Estratégia conservativa não permite reaproveitamento espacial

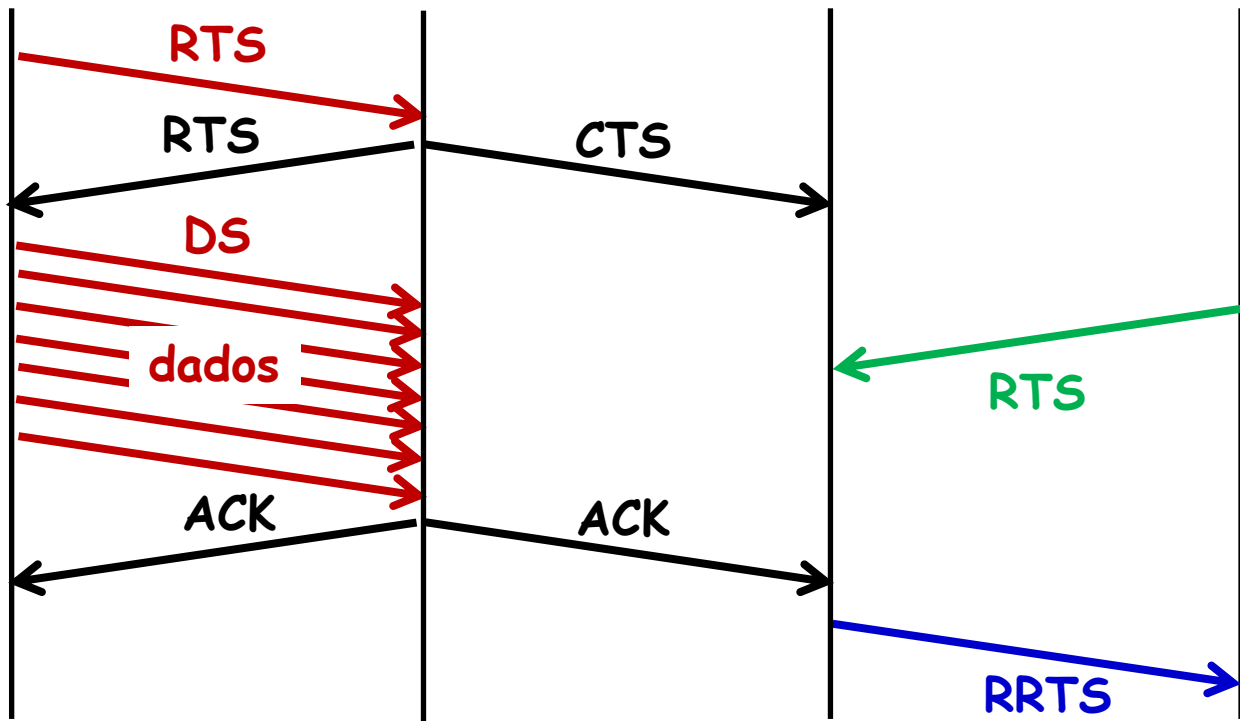
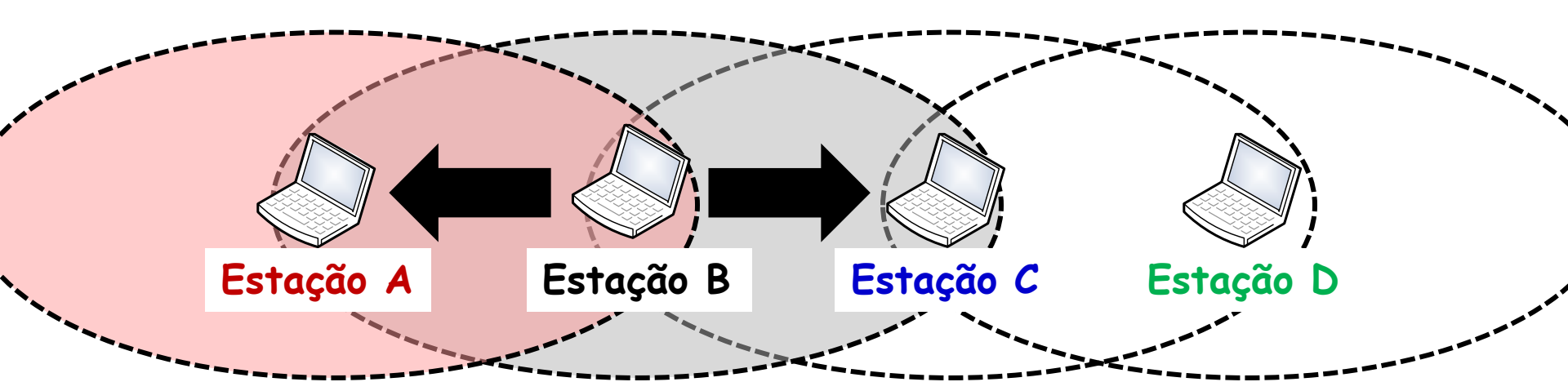
MACAW: Modificações em Relação ao MACA



A recepção do DS impede que C comece uma transmissão para D antes que B receba o ACK do A

MACAW: Modificações em Relação ao MACA

- Problema do sincronismo entre estações
 - Uma estação pode enviar um RTS e não receber o CTS
 - **Problema:** Estação que não recebe o CTS aumenta a janela de contenção assumindo que houve colisão
 - **Motivo:** Estação que recebe o RTS não envia o CTS porque tem alguma transmissão de dados em sua vizinhança
 - **Consequências:** Estação que enviou o RTS pode adiar a retransmissão por tempo excessivo, já que não sabe quando o meio ficará livre
 - **Solução:** Estação que não enviou o CTS avisa a estação que enviou o RTS o momento que o meio ficará livre novamente
 - Uso do RRTS (*Request for RTS*)



RRTS avisa D que o meio está livre e que o RTS já pode ser retransmitido

FAMA (*Floor Acquisition Multiple Access*)

- Escuta de portadora
 - Assume que não é viável evitar colisões sem escuta de portadora
- Espera por tempo suficiente entre mensagens diferentes
 - Tempo proporcional ao tempo de propagação na rede
 - Tempo é chamado de "espaços entre quadros" (*inter-frame spaces*)

FAMA (Floor Acquisition Multiple Access)

- Operação:
 - Depois de escutar um RTS de outra estação:
 - Estação deve esperar tempo suficiente para que o CTS seja enviado pelo receptor e recebido pelo transmissor
 - Depois de escutar um CTS de outra estação:
 - Estação deve esperar tempo suficiente para que a outra estação tenha tempo de receber os dados
 - Depois de escutar um pacote de dados:
 - Estação deve esperar um tempo definido pelo ACK
 - Depois de escutar ruído (colisão de pacotes):
 - Estação deve esperar o ruído terminar e ainda por um tempo suficiente para que uma estação receba um pacote com o tamanho máximo possível

CSMA/CA

- Combina características de outros protocolos:
 - **CSMA**: Escuta de portadora
 - **MACA**: Usa opcionalmente RTS/CTS e backoff exponencial binário
 - **MACAW**: Usa ACKs
 - **FAMA**: Espaços entre quadros

CSMA/CA (Fonte: Kurose e Ross, 6ª. Edição)



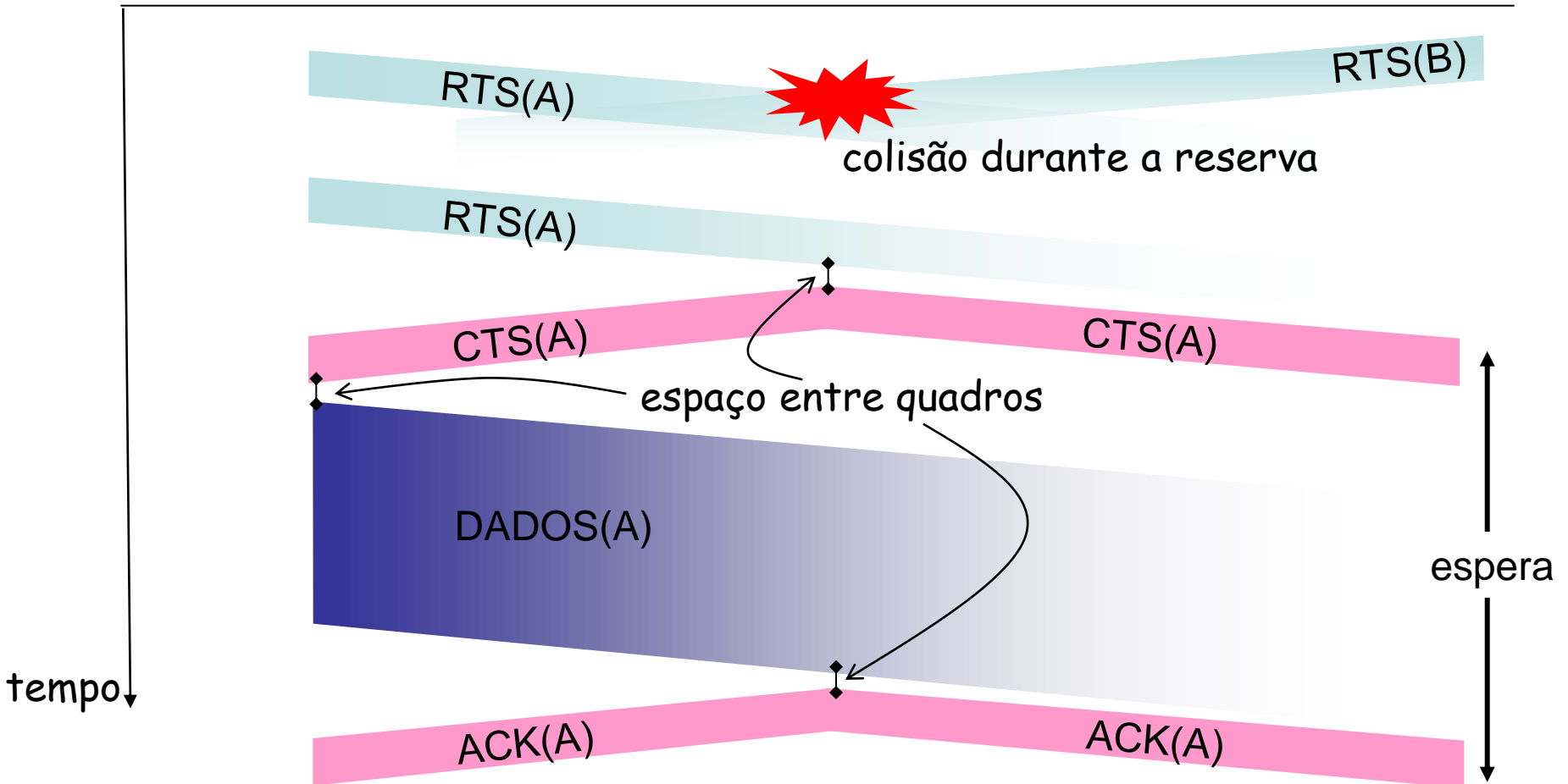
A



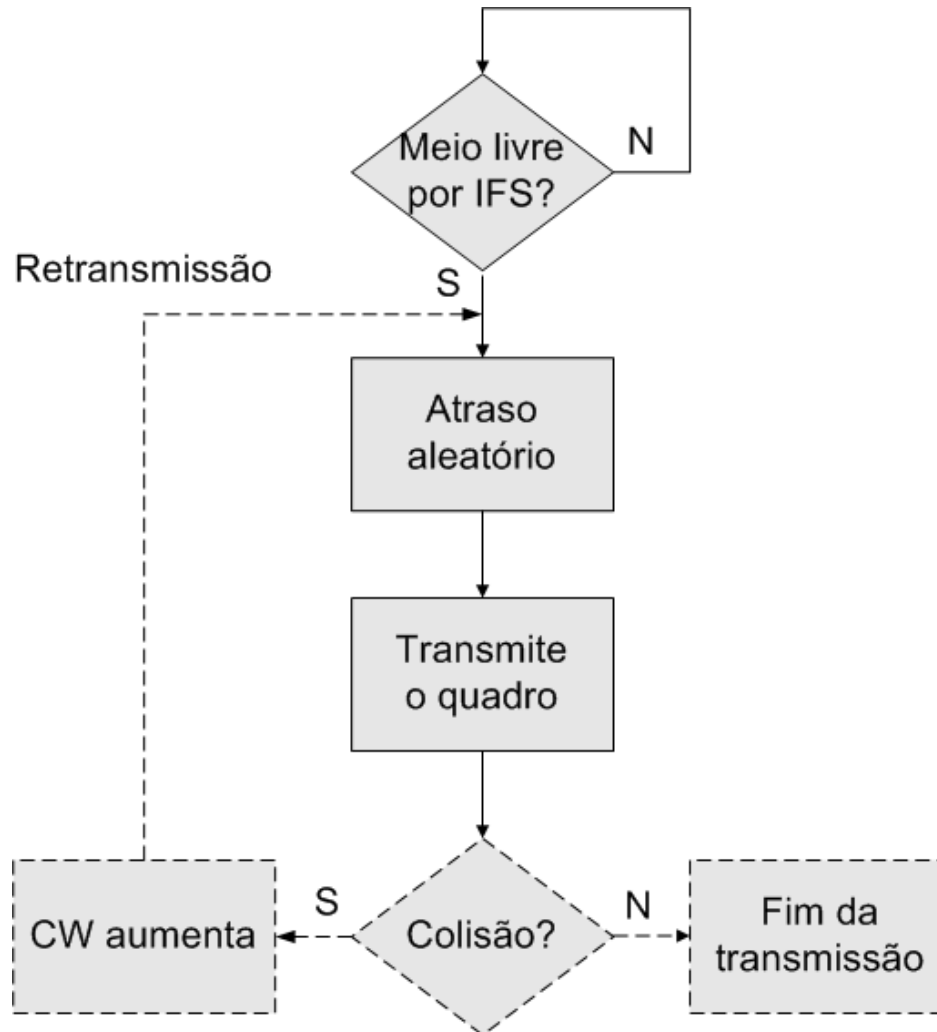
AP



B



CSMA/CA



Protocolos Livres de Contenção (Divisão do Canal)

Protocolos de Divisão do Canal

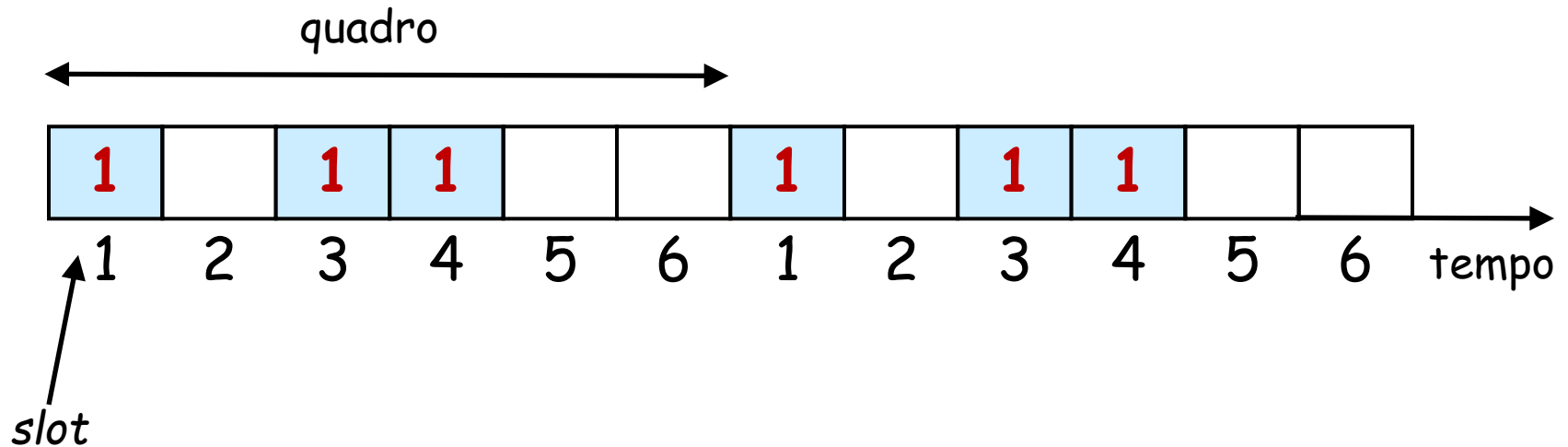
- Acesso ao meio é dividido entre as estações
 - Não podem ocorrer colisões
- Estação divide a taxa máxima do canal com outras estações
- Exemplos:
 - TDMA
 - FDMA
 - CDMA

TDMA

- Acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access*)
- Acesso múltiplo feito em função do tempo
- Tempo é dividido em *slots*
 - Geralmente de tamanho fixo e igual ao tempo para transmitir um pacote
- Em cada *slot* **somente uma estação pode transmitir**
 - Acesso ao canal em "turnos"

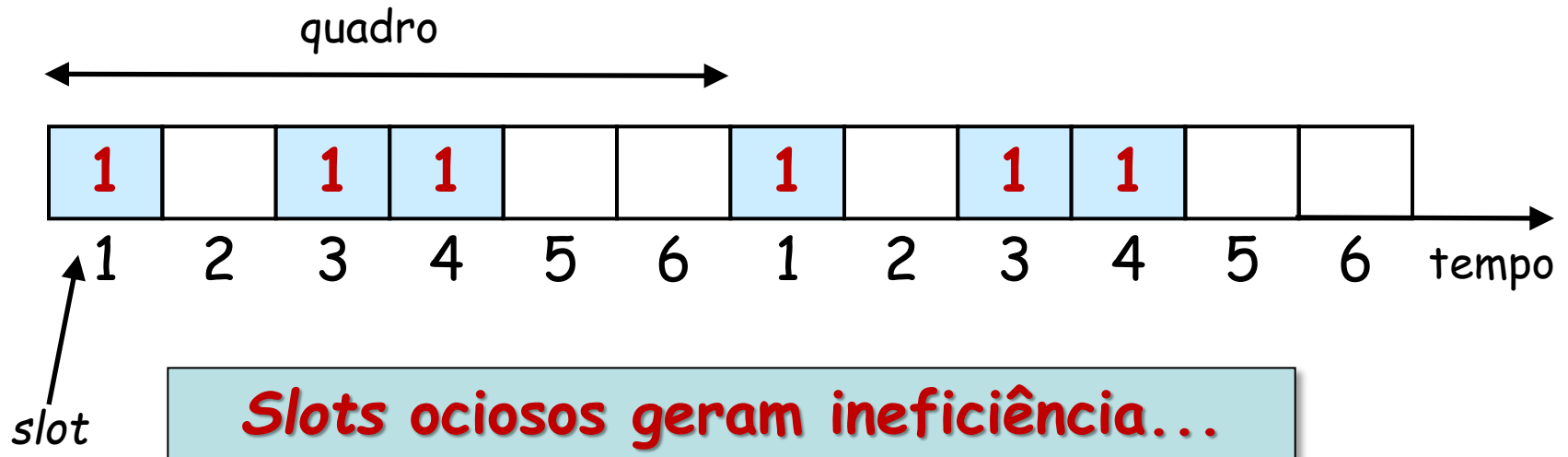
TDMA

- Exemplo
 - Rede local com 6 estações
 - Slots 1, 3 e 4 com pacotes
 - Slots 2, 5 e 6 ociosos



TDMA

- Exemplo
 - Rede local com 6 estações
 - Slots 1, 3 e 4 com pacotes
 - Slots 2, 5 e 6 ociosos



FDMA

- Acesso múltiplo por divisão de frequência (*Frequency Division Multiple Access*)
- Acesso múltiplo feito em função da frequência
- Espectro do canal dividido em bandas de frequência
 - Cada estação está associada a uma banda de frequência diferente
- Problema semelhante ao TDMA
 - Tempo de transmissão não usado nas bandas permanecem ociosos

CDMA

- Acesso múltiplo por divisão de código (*Code Division Multiple Access*)
- Acesso múltiplo feito em função do código
 - Cada estação está associada a um código diferente
 - Destino deve conhecer o código da fonte
- Muito usado em redes sem fio
- Vantagem
 - Estações podem transmitir simultaneamente usando códigos diferentes

Multiplexação

- Tem por objetivo compartilhar o meio físico
 - Divisão do meio ocorre na camada física
 - Geralmente centralizada em um dispositivo denominado multiplexador
- Pode ser classificada em função da variável usada para separar as fontes
 - Divisão de tempo (*Time Division Multiplexing - TDM*)
 - Divisão de frequência (*Frequency Division Multiplexing - FDM*)
 - Divisão de comprimentos de onda (*Wavelength Division Multiplexing - WDM*)

Duplexação

- Tipo especial de multiplexação
- Comunicação entre duas estações pode ser classificada em:
 - *Simplex* → único sentido
 - *Half-duplex* → dois sentidos, não simultaneamente
 - *Full-duplex* → dois sentidos, simultaneamente
- Também pode ser classificada em função da variável usada para separar as fontes
 - Divisão de tempo (*Time Division Duplexing* - TDD)
 - Divisão de frequência (*Frequency Division Duplexing* - FDD)

Protocolos Livre de Contenção (Revezamento)

Protocolos de Revezamento

- Divisão de canal
 - Eficiente para carga alta
 - Compartilhamento justo do canal
 - Ineficiente para carga baixa
 - Atraso no canal de acesso
 - Divisão da largura de banda mesmo com apenas 1 nó ativo!
- Acesso aleatório
 - Ineficiente para carga alta
 - Sobrecarga causada por colisões
 - Eficiente para carga baixa
 - Um único nó pode utilizar completamente o canal

Protocolos de Revezamento

- Divisão de canal
 - Eficiente para carga alta
 - Compartilhamento justo do canal
 - Ineficiente para carga baixa
 - Atraso no canal de acesso
 - Divisão da largura de banda mesmo com apenas 1 nó ativo

Revezamento une o melhor dos dois mundos!

- Acesso aleatório
 - Ineficiente para carga alta
 - Sobrecarga causada por colisões
 - Eficiente para carga baixa
 - Um único nó pode utilizar completamente o canal

Protocolos de Revezamento

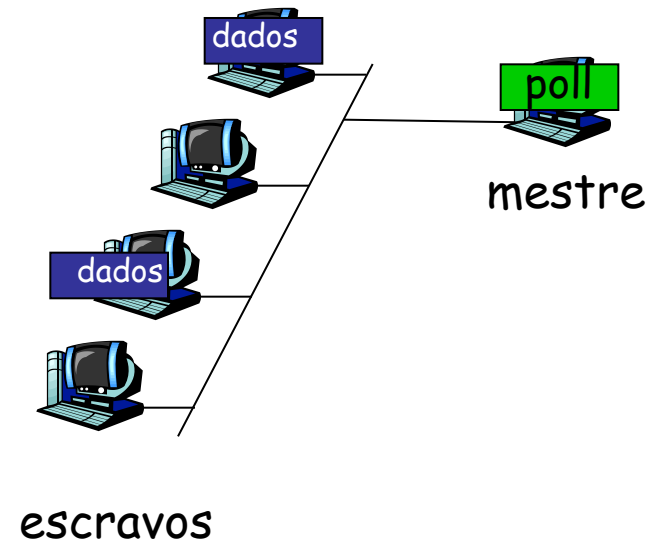
- Geralmente o acesso ao meio é realizado em função de uma **estação centralizadora**
 - Determina quando uma dada estação pode transmitir
 - Garante a ausência de colisões
- Estação compartilha a taxa do canal com outras estações

Protocolos de Revezamento

- Varredura (*polling*)
- Reserva
- Passagem de ficha de permissão (*token*)
- Outros

Varredura (*polling*)

- Estação controladora envia mensagens a outras
 - Convidando-as a transmitir dados
- Estações ao serem consultadas podem transmitir dados
- Ordem das consultas-convites
 - Lista salva na estação controladora
- Desvantagens
 - Introduz um atraso de seleção
 - Sobrecarga de controle
 - Ponto único de falha

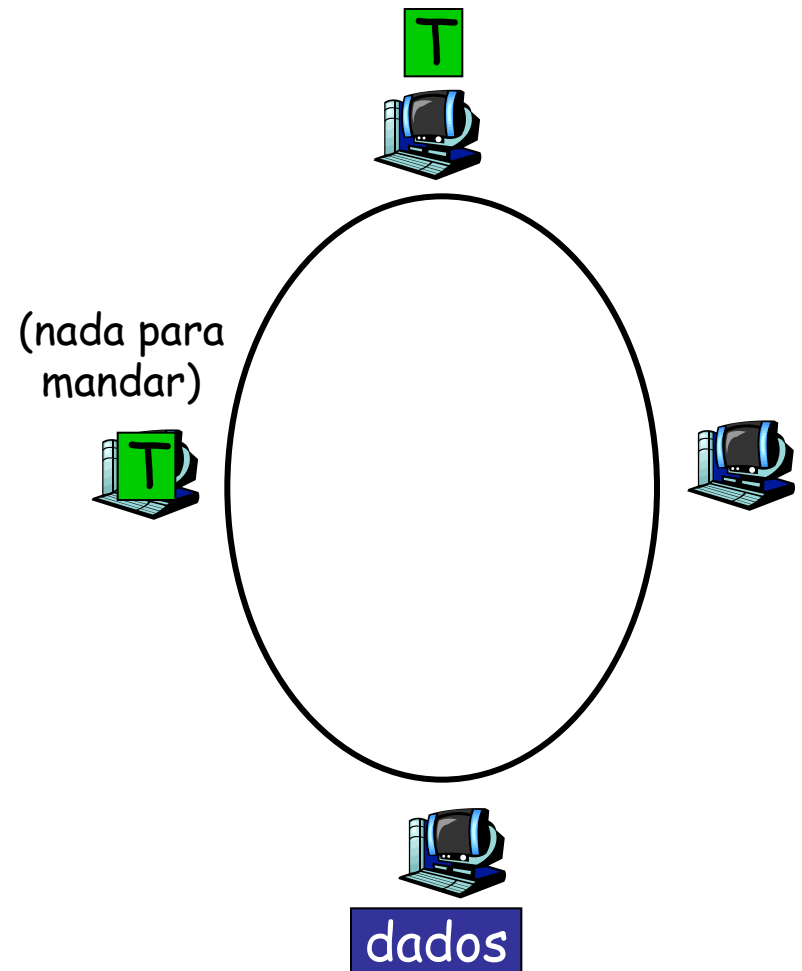


Reserva

- Estações reservam o direito de acessar o meio compartilhado
- Pedidos de reserva são enviados pelas estações
 - Processados pela estação centralizadora que escalona o posterior acesso ao meio
 - Dependendo do protocolo, pode haver colisões de pedidos

Passagem de Ficha de Permissão (token)

- Não existe estação centralizadora
- Ficha é a permissão para a transmissão de dados
- Ficha é passada de estação a estação obedecendo uma ordem
 - Ao obter a ficha, a estação pode transmitir dados
- Usada no Token Ring e no FDDI



Passagem de Ficha de Permissão (*token*)

- Desvantagens
 - Sobrecarga com a passagem da permissão
 - Aumento da latência
 - Falha em uma estação pode derrubar o canal inteiro
 - Ficha pode ser "perdida" em uma estação

Resumo dos Protocolos MAC

- Protocolos baseados em contenção
 - Acesso Aleatório: ALOHA, S-ALOHA, CSMA, MACA/MACAW, FAMA, CSMA/CA, CSMA/CD
 - Alguns usam escuta da portadora
 - Fácil em algumas tecnologias (cabeadas), mas difícil em outras (sem fio)
 - Outros fazem reserva do meio para transmissão
 - E alguns confirmam a recepção de quadros
 - CSMA/CD usado no Ethernet
 - CSMA/CA usado no IEEE 802.11 (WiFi)

Resumo dos Protocolos MAC

- Protocolos livres de contenção
 - Divisão do canal por tempo, frequência ou código
 - Divisão de tempo, Divisão de frequência
 - Revezamento
 - Varredura (*polling*) a partir de um ponto central, reserva, passagem de permissões

Leitura Recomendada

- Capítulo 3 do livro
 - Andrew S. Tanenbaum e David J. Wetherall, "Computer Networks", 5a. Edição, Editora Pearson, 2011
- Capítulo 5 e 6 do livro
 - Jim Kurose and Keith Ross, "Computer Networking: A Top Down Approach", 5a. Ed., Editora Pearson, 2010
- Capítulo 2 do livro
 - Miguel Elias M. Campista e Marcelo G. Rubinstein, "Advanced Routing Protocols for Wireless Networks", 1ª Edição, Wiley-Interscience

Leitura Recomendada

- L. Kleinrock e F. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels: Part I - Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics", Em IEEE Transactions on Communications, vol. 23, no. 12, pp. 1400-1416, Dezembro de 1975
- Phil Karn, "MACA: A New Channel Access Method for Packet Radio". Em proceedings of the 9th ARRL Computer Networking, 1990
- Vaduvur Bharghavan, Alan Demers, Scott Shenker, e Lixia Zhang, "MACAW: a media access protocol for wireless LAN's". Em Conference on Communications architectures, protocols and applications (SIGCOMM'94), 1994

Material Utilizado

- Notas de aula dos professores:
 - Igor Monteiro Moraes: <http://www2.ic.uff.br/~igor>
 - Marcelo Gonçalves Rubinstein: <http://www.lee.eng.uerj.br/~rubi/>