



IMD0043

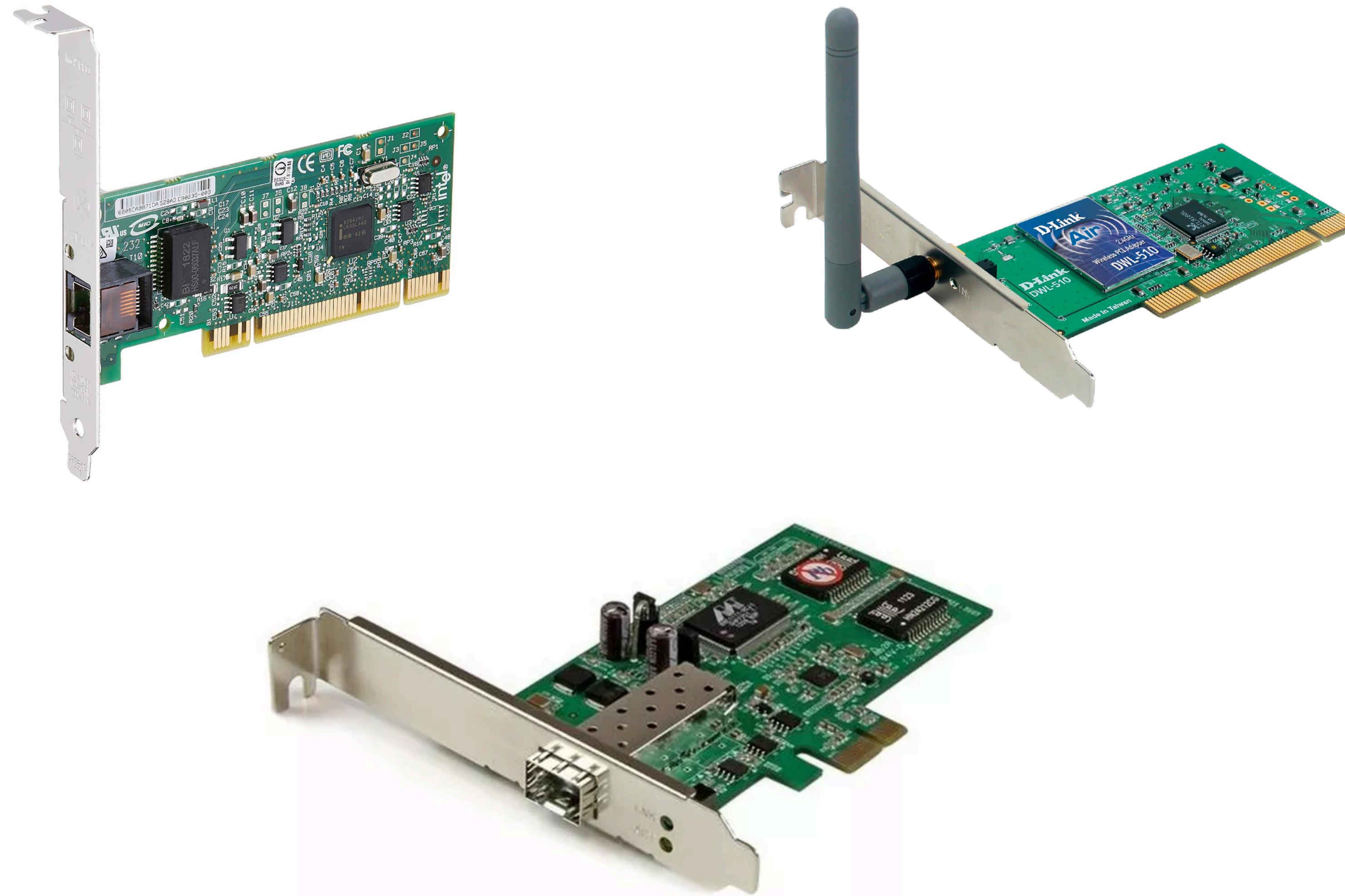
CAMADA DE ENLACE



CAMADA DE ENLACE DE DADOS

- ▶ Ponto-a-ponto
 - ▶ As ideias que discutimos até então foram ponto-a-ponto
- ▶ Broadcast
 - ▶ Projeto original dos protocolos da camada de enlace
 - ▶ Versões mais atuais migraram para ponto-a-ponto
- ▶ Adaptadores de rede (ex: NIC - Network Interface Card)
 - ▶ O *hardware* que conecta uma máquina a rede
 - ▶ Tem um identificador: endereço MAC (Medium Access Control)

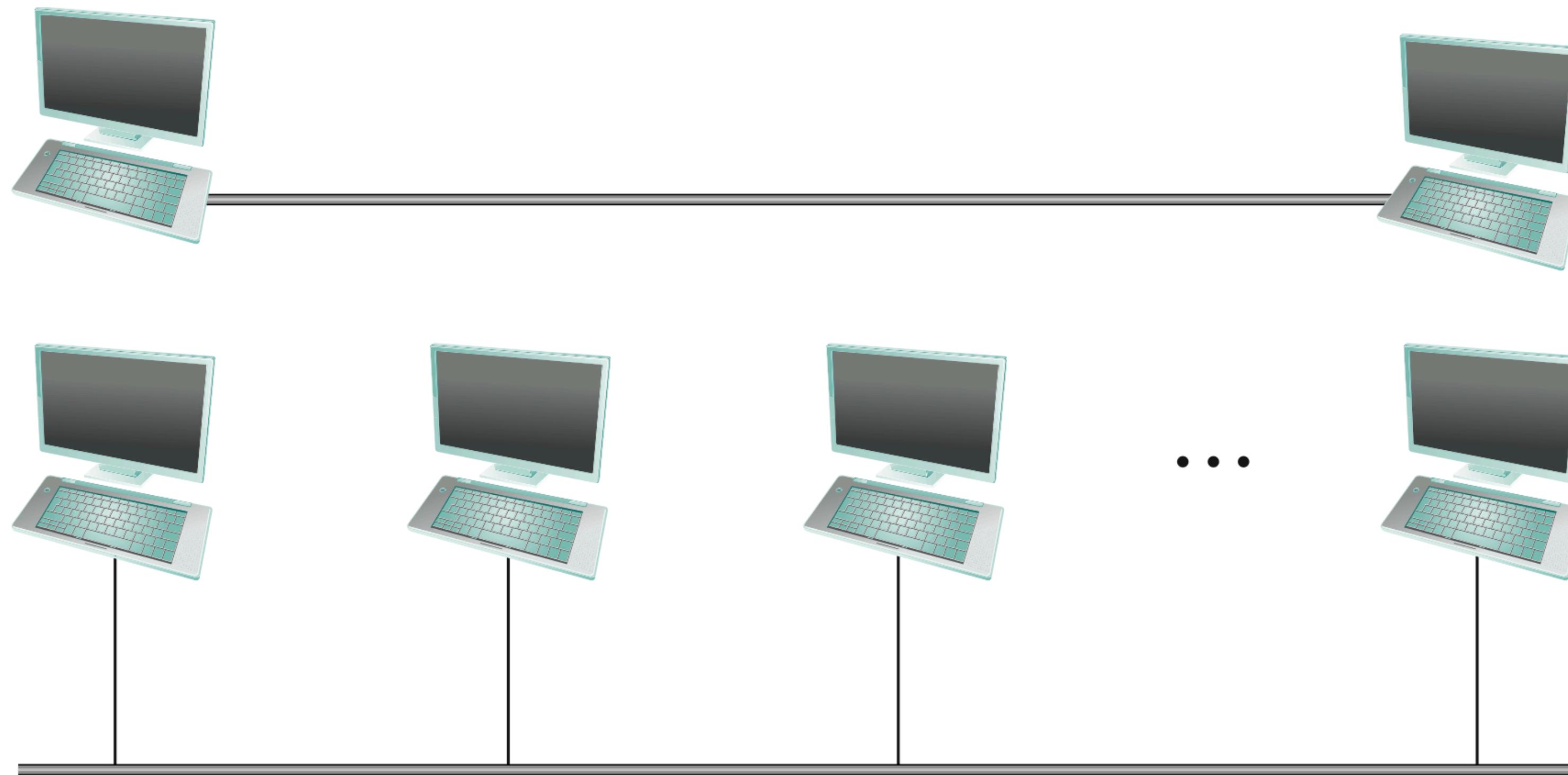
NICS



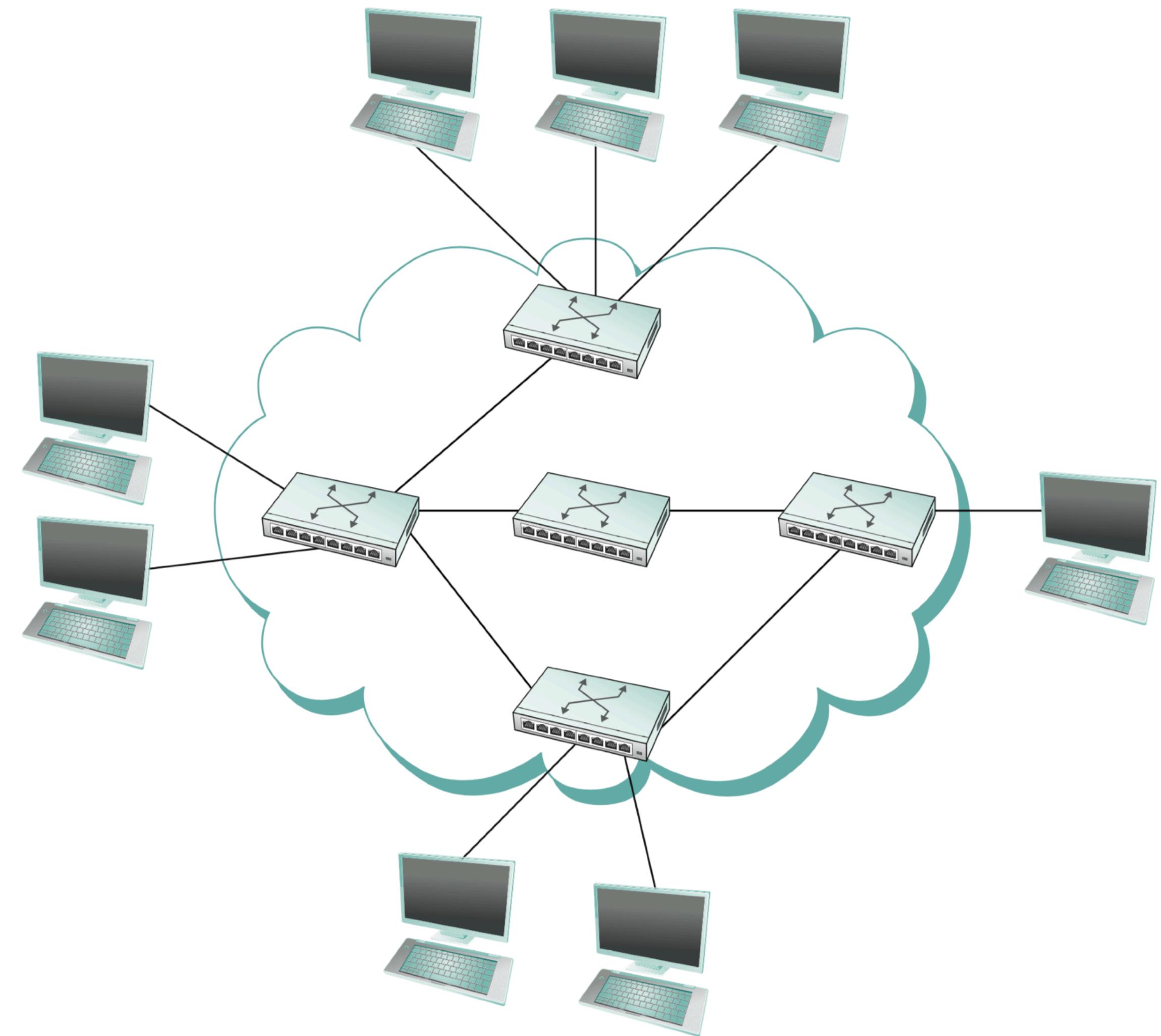
PONTO-A-PONTO VS BROADCAST

- ▶ Ponto-a-ponto: comunicação **dedicada** em pares
 - ▶ Ex: *link* de fibra óptica
 - ▶ Ex: *link* ponto-a-ponto entre dois roteadores
- ▶ Broadcast: meio (guiado ou não guiado) **compartilhado**
 - ▶ Ex: *link* tradicional da camada de enlace (Ethernet)
 - ▶ Ex: 802.11 WLAN

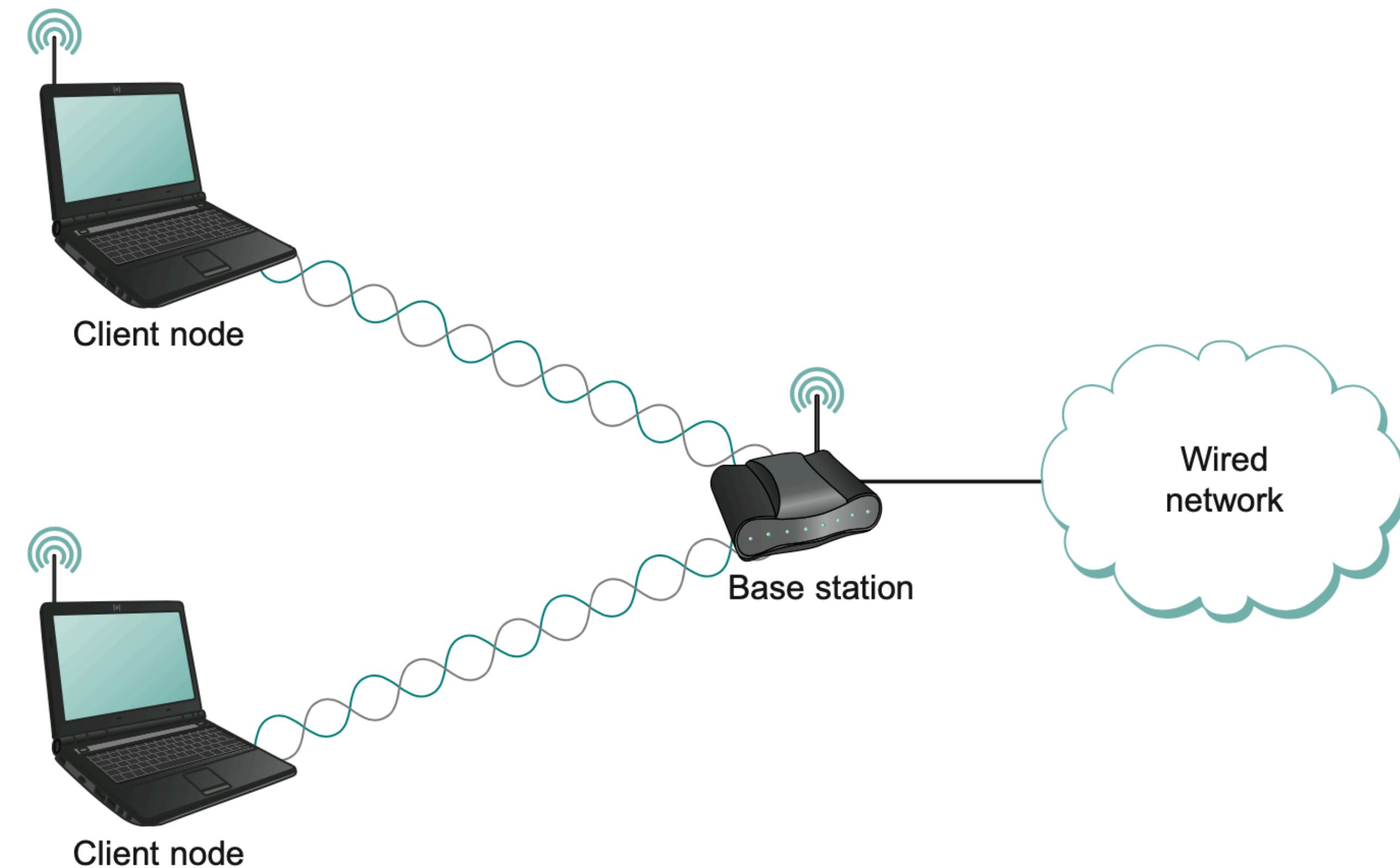
PONTO-A-PONTO VS BROADCAST



PONTO-A-PONTO VS BROADCAST



PONTO-A-PONTO VS BROADCAST



CAMADA DE ENLACE EM MEIOS GUIADOS: BROADCAST (ATÉ ANOS ~2000)

Meio compartilhado

- ▶ Problema fundamental: **colisões!**
- ▶ Como determinar quem tem **direito** de usar o canal quando mais de um host necessita usá-lo **simultaneamente?**



MEIO COMPARTILHADO: PROPRIEDADES DESEJADAS

- ▶ Somente um: entrega de dados
- ▶ Como projetamos um protocolo para entrega de dados em um meio compartilhado ?



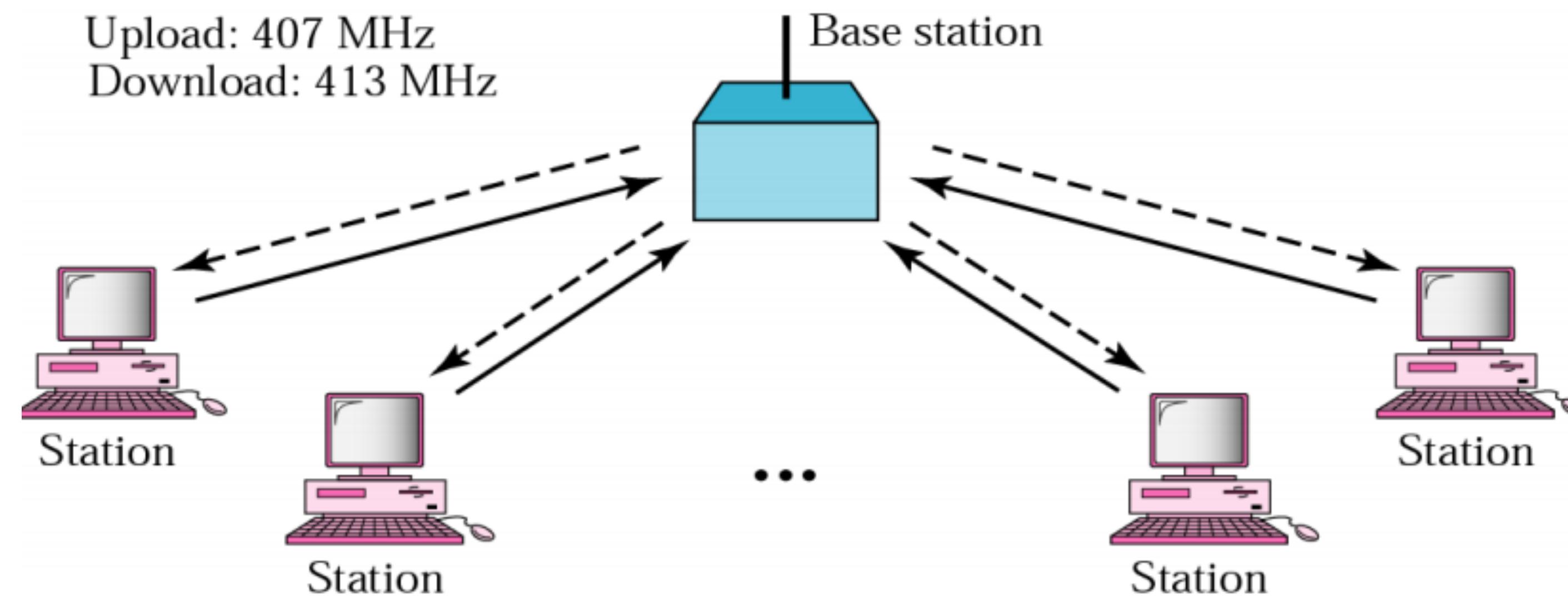
ONDE TUDO COMEÇOU: ALOHANET

Norm Abramson

- ▶ Saiu de Stanford em 1970 para... ir surfar!
- ▶ Implementou o primeiro sistema de comunicação para as ilhas do Havaí
- ▶ Hub central na Universidade do Havaí, em Oahu



ALOHA (ORIGINAL)



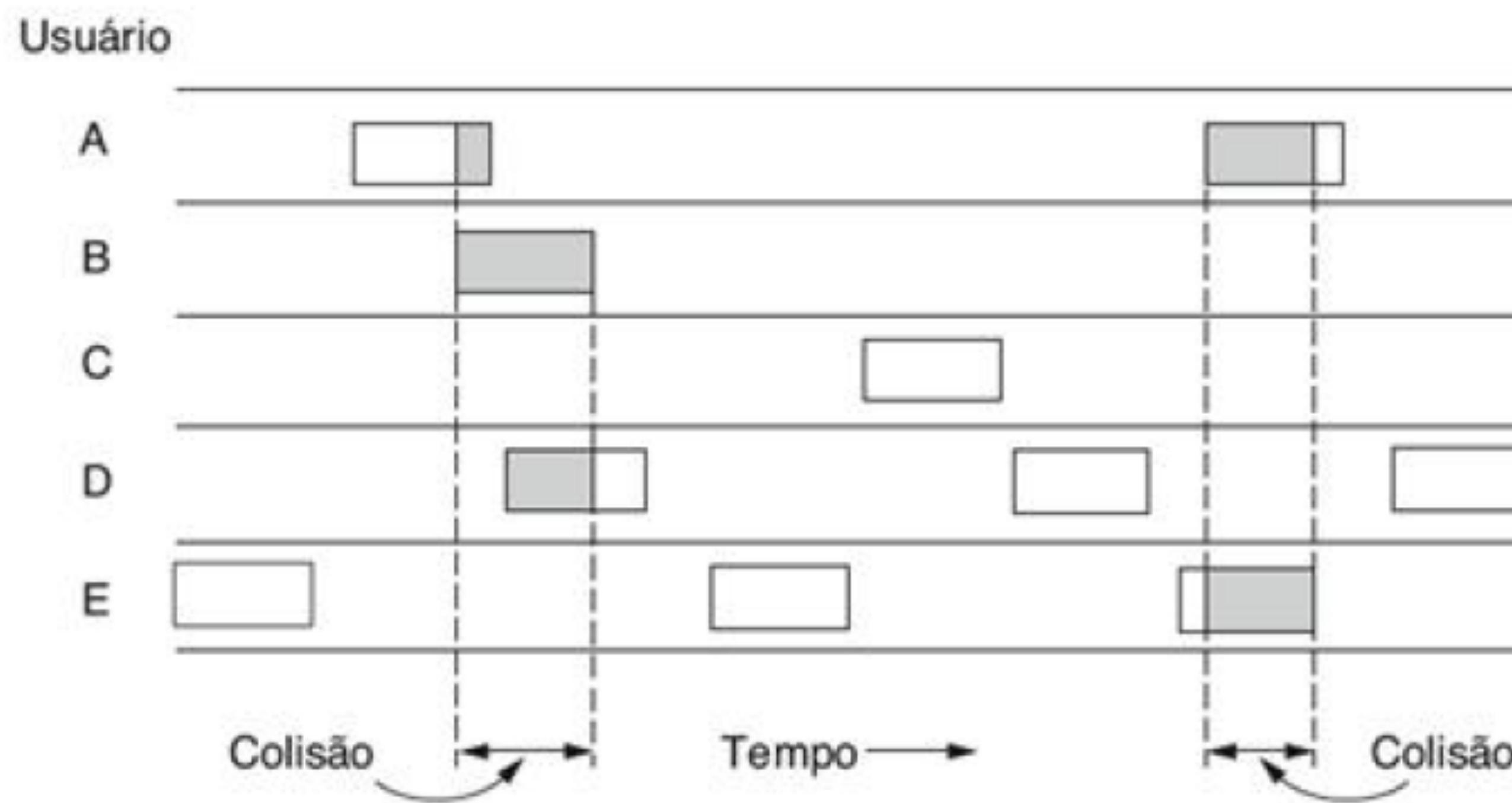
ALOHA (ORIGINAL)

- ▶ As estações transmitem pacotes para um *hub* central
- ▶ Canal de acesso aleatório
- ▶ Se o pacote não for recebido (devido a colisão), a estação retransmite
- ▶ Utiliza reconhecimento (*ack*) positivo de pacotes
- ▶ Hub envia pacotes para todas as estações
- ▶ **Desafio:** Requer um *hub* centralizado
 - ▶ Se o *hub* falha, a rede inteira falha
 - ▶ Nem sempre o melhor design

ALGORITMO ALOHA (ORIGINAL)

1. Transmite o quadro
2. Aguarde o reconhecimento da recepção por T unidades de tempo; se recebido, fim
3. Se não for recebido o reconhecimento, gere um número aleatório r entre 0 e R
4. Vá para o passo 1 após r unidades de tempo

ALGORITMO ALOHA (ORIGINAL)



COMPARTILHANDO UM CANAL BROADCAST

- ▶ Contexto: canal broadcast compartilhado
 - ▶ Deve evitar/lidar com múltiplas estações falando simultaneamente
 - ▶ Caso contrário, colisões levam a dados ilegíveis
 - ▶ É necessário um **algoritmo distribuído** para compartilhar o canal
 - ▶ Algoritmo determina **quando e quem** pode transmitir
- ▶ Três classes de técnicas:
 - ▶ **Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência**: divide o canal em frequências
 - ▶ **Múltiplo Acesso por Divisão de Tempo**: divide o canal em slots de tempo
 - ▶ **Acesso Aleatório**: permite acesso descoordenado
 - ▶ Detecta colisões, e se necessário, recupera dessas colisões
 - ▶ Similar ao estilo Internet!

MÚLTIPLA ACESSO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIA (FDMA)

- ▶ Divide o canal em **frequências**
- ▶ Para cada estação é designada para um subconjunto dessas frequências
 - ▶ E transmite os dados somente na frequência designada
- ▶ Vantagens: **sem colisões**
- ▶ Desvantagens:
 - ▶ Uma estação pode não ter nada para transmitir (desperdício)

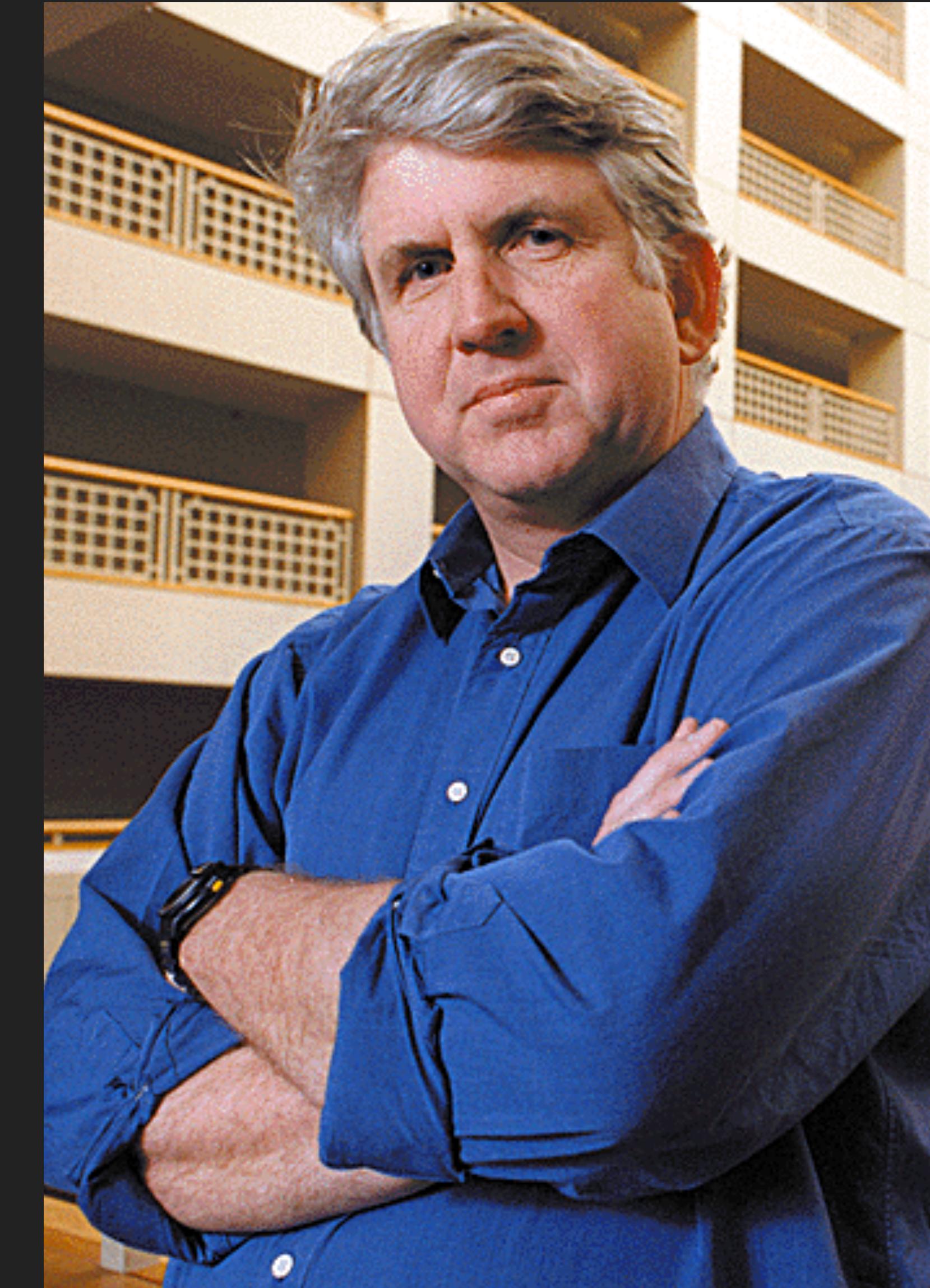
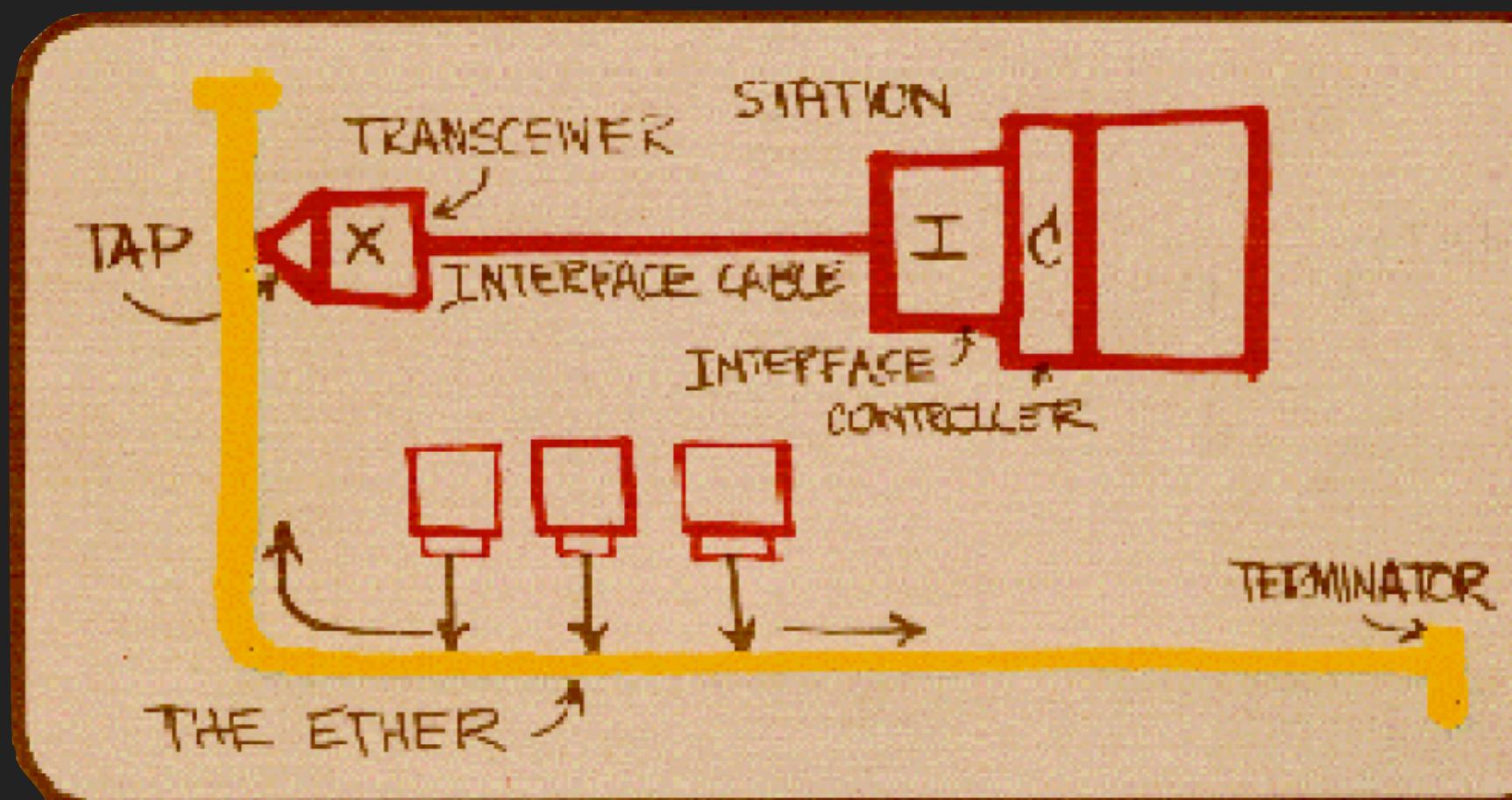
MÚLTIPLA ACESSO POR DIVISÃO DE TEMPO (TDMA)

- ▶ Divide o canal em *slots de tempo*
- ▶ Divide os dados em quadros
 - ▶ De forma que um quadro possa ser enviado em um *slot*
- ▶ Para toda estação é designada um subconjunto de *slots*
 - ▶ E só pode transmitir um quadro no seu *slots* designado
- ▶ Vantagens: **sem colisões**
- ▶ Desvantagens:
 - ▶ Durante um *slots*, uma estação pode não ter nada para transmitir (desperdício)
 - ▶ Quando uma estação tem algo para enviar tem que esperar o seu *slot*

ACESSO ALEATORIO

Bob Metcalfe

- ▶ Xerox PARC
- ▶ Visita o Havaí, absorve a ideia do Aloha
- ▶ Meio guiado compartilhado



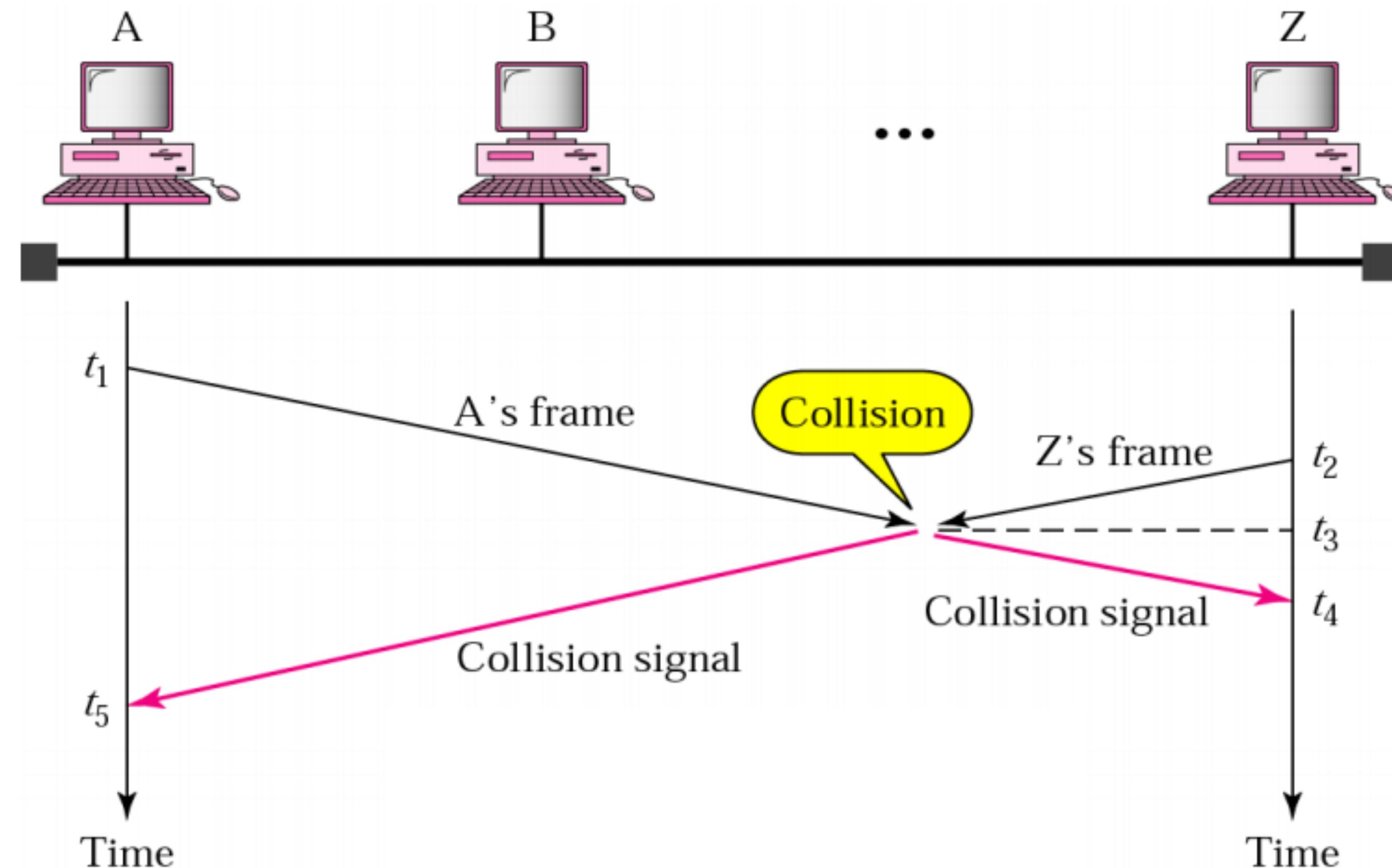
PROTOCOLO DA CAMADA DE ENLACE

- ▶ Quando uma estação tem um quadro para enviar
 - ▶ Transmite usando toda a largura de banda
 - ▶ Não existe coordenação *a priori* entre os nós
- ▶ Duas ou mais estações transmitindo => **colisão**
 - ▶ Quadro(s) perdidos
- ▶ Protocolo da camada de enlace especifica:
 - ▶ Como detectar colisões
 - ▶ Como se recuperar de colisões

CSMA (CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS)

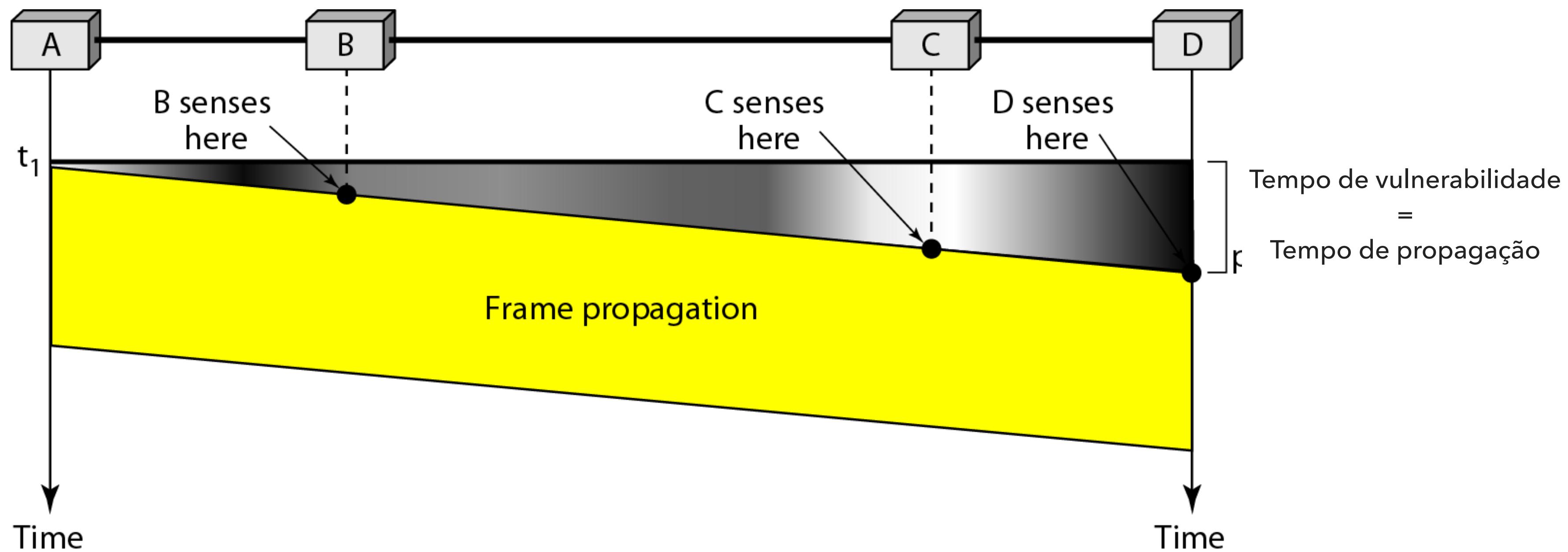
- ▶ “Escuta” o meio de transmissão antes de transmitir algo (CS)
 - ▶ Verifica se existe transmissão em progresso
 - ▶ Se o meio está livre: estação transmite o quadro
 - ▶ Se o meio está ocupado: adia a transmissão
 - ▶ Analogia humana: não interrompa os outros!
 - ▶ Isso elimina todas as colisões?
 - ▶ **Não**, porque existe o atraso de propagação!

CSMA (CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS)



Escutar antes de transmitir não elimina a ocorrência de colisões

CSMA (CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS)



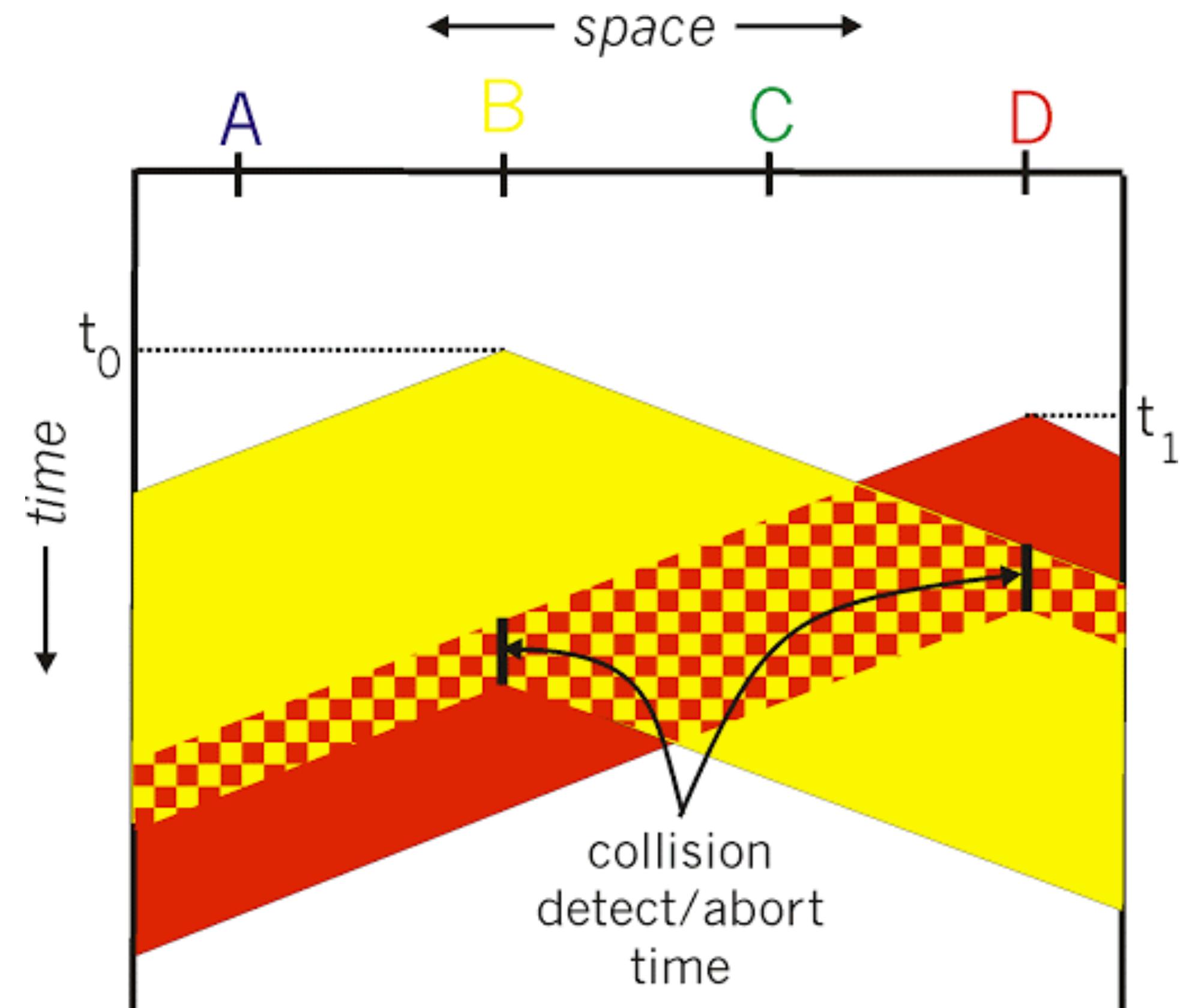
Escutar antes de transmitir não elimina a ocorrência de colisões

CSMA/CD (CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS WITH COLLISION DETECTION)

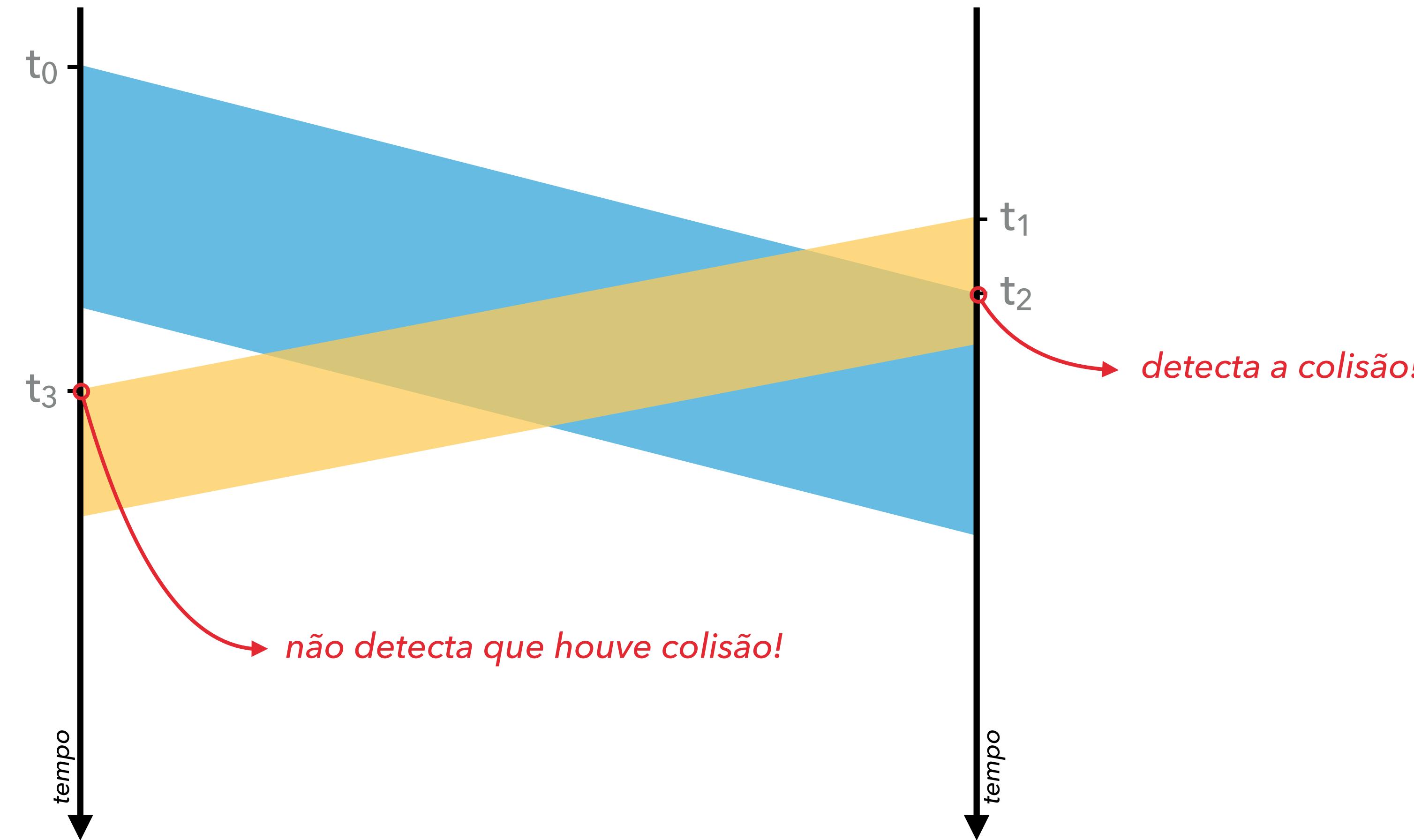
- ▶ Solução:
 - ▶ Incluir um mecanismo de detecção de colisão (CD)
 - ▶ Se uma colisão for detectada, retransmitir
- ▶ CSMA/CD
 - ▶ Colisões detectadas rapidamente
 - ▶ Transmissões colididas abortadas, reduzindo desperdício
- ▶ Detecção de colisão é fácil em redes multiacesso (*broadcast*)
 - ▶ Basta comparar o sinal transmitido com o recebido
- ▶ Detecção de colisão é difícil em redes sem fio

CSMA/CD (CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS WITH COLLISION DETECTION)

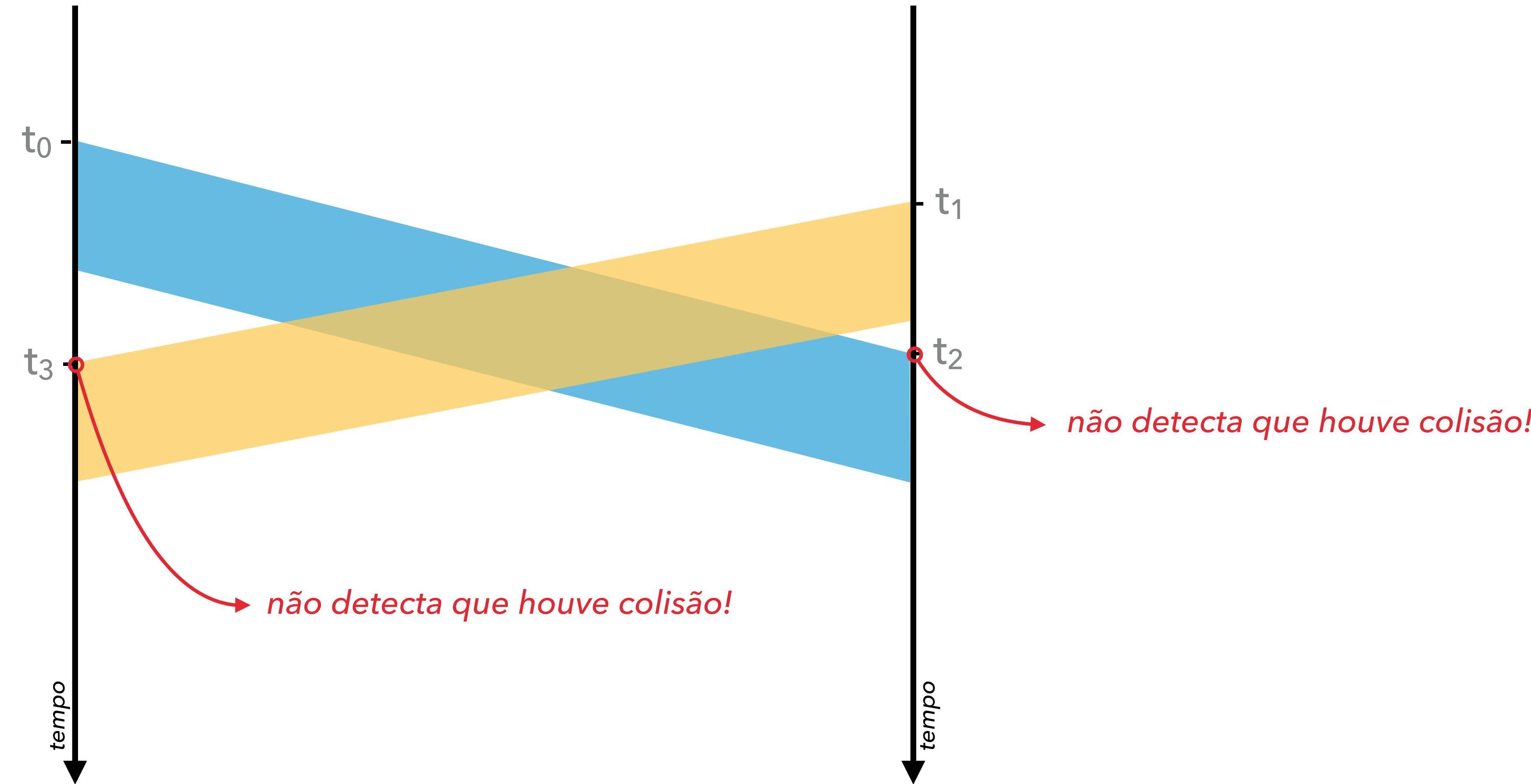
- ▶ **B** e **D** podem detectar a ocorrência da colisão
- ▶ Porém, precisamos de restrições em:
 - ▶ tamanho mínimo do quadro
 - ▶ distância máxima
- ▶ Por que?



O QUE PRECISAMOS EVITAR PARA CONSEGUIR DETECTAR A COLISÃO?



O QUE PRECISAMOS EVITAR PARA CONSEGUIR DETECTAR A COLISÃO?



O QUE PRECISAMOS EVITAR PARA CONSEGUIR DETECTAR A COLISÃO?

- ✓ Tamanho mínimo do quadro
- ✓ Distância máxima do link

LIMITES DE COMPRIMENTO DO MEIO E TAMANHO DO QUADRO NO CSMA/CD



Atraso de propagação depende do comprimento físico do link

- ▶ Tempo de propagar um *bit* de uma ponta a outra

Suponha que A envia um pacote no instante de tempo 0

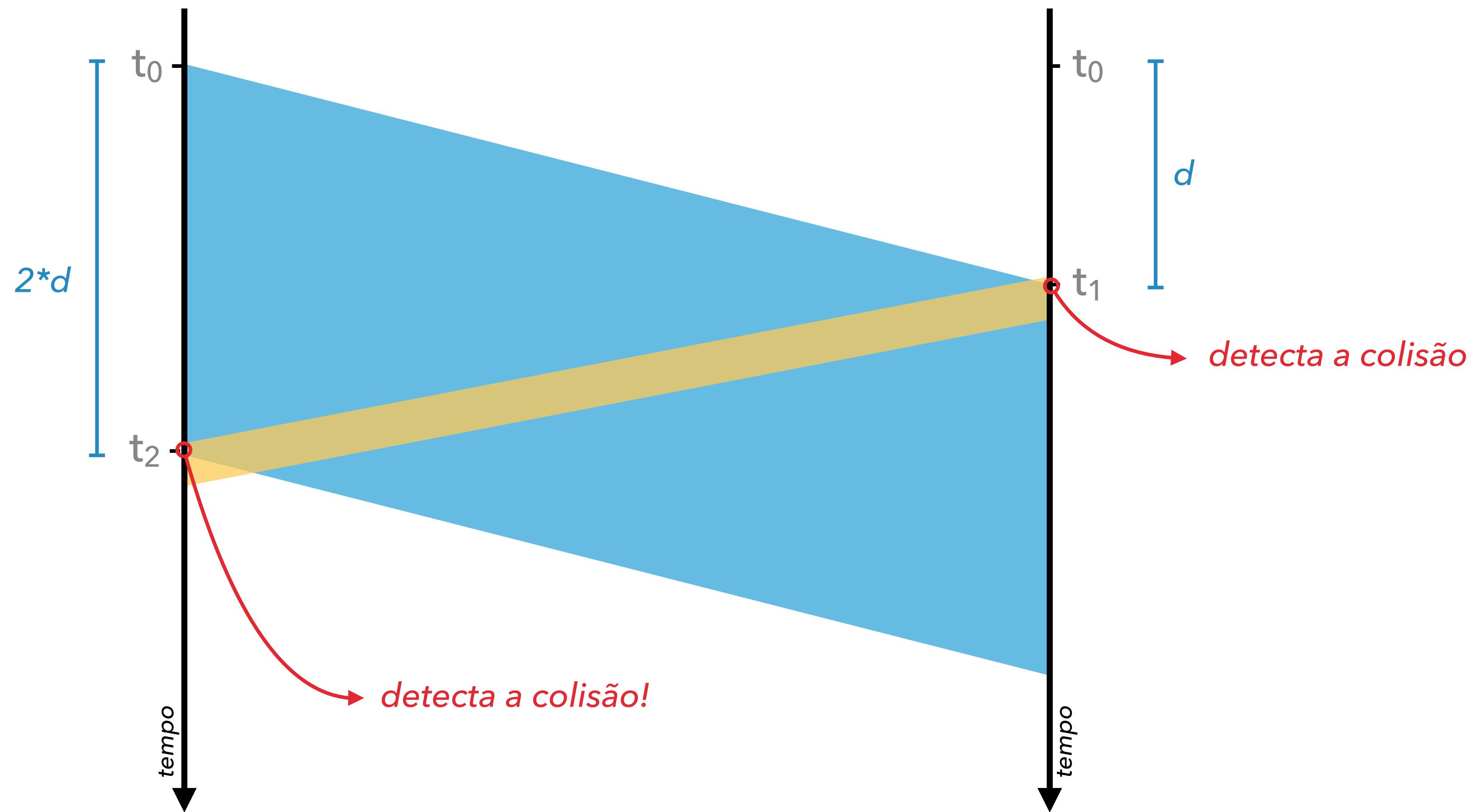
- ▶ B escuta o meio livre todo o tempo antes de d
- ▶ ... então B começa a transmitir um pacote

B detecta a colisão no tempo d , e envia sinal de interferência (*jamming*)

- ▶ Mas A não pode detectar a colisão antes de $2d$ (pior cenário!)
- ▶ A deve ter um tamanho de quadro suficiente para que o tempo de transmissão seja $> 2d$
- ▶ Tempo de transmissão $> 2 * (\text{atraso de propagação})$

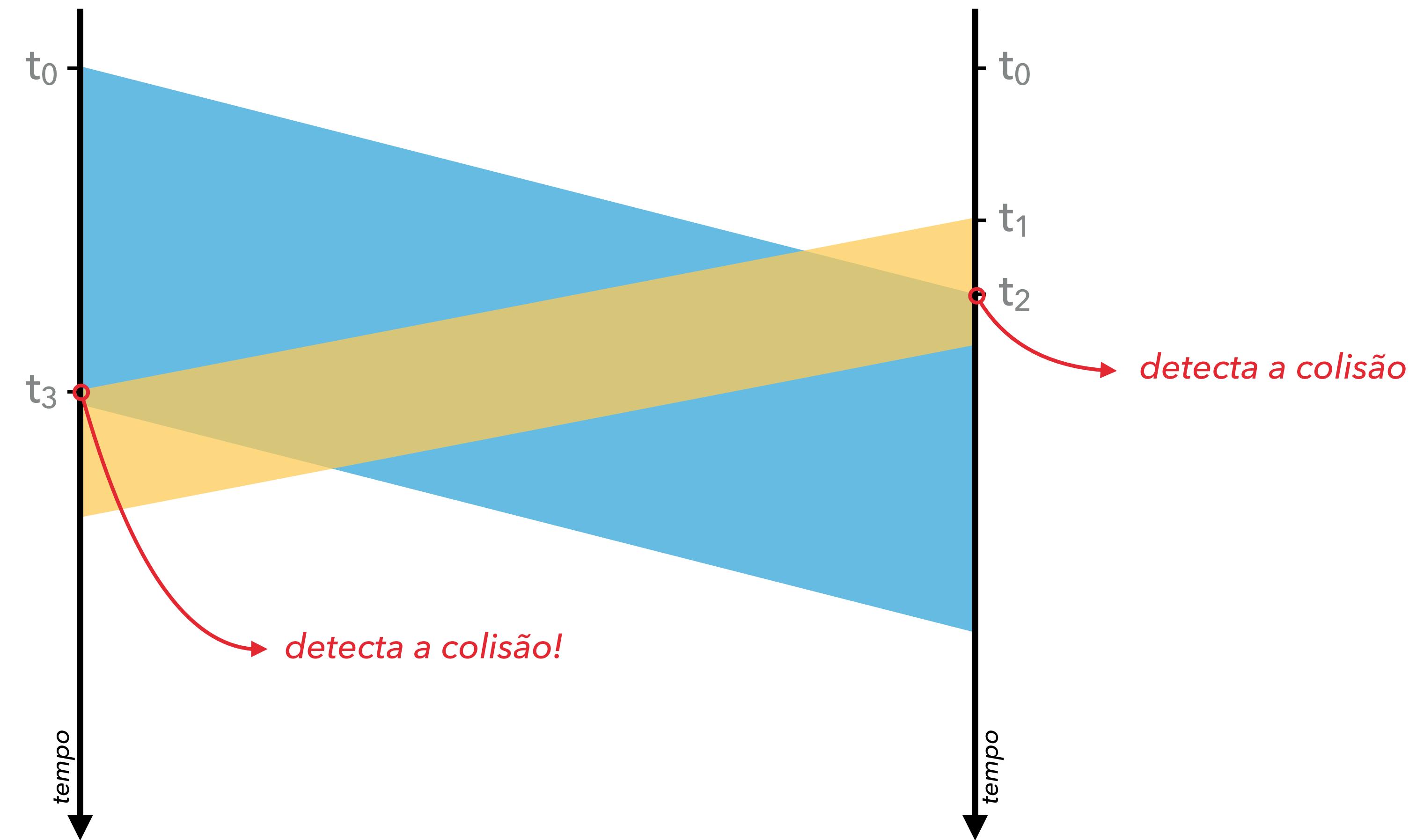
COM O CRITÉRIO RESPEITADO É POSSÍVEL DETECTAR A COLISÃO!

Tempo de transmissão > 2*(atraso de propagação)



COM O CRITÉRIO RESPEITADO É POSSÍVEL DETECTAR A COLISÃO!

Tempo de transmissão > 2*(atraso de propagação)



LIMITES DE COMPRIMENTO DO MEIO E TAMANHO DO QUADRO NO CSMA/CD



- ▶ Tempo de transmissão > 2*(atraso de propagação)
- ▶ Exemplo:
 - ▶ Largura de banda de 100Mbps
 - ▶ Quadro de tamanho mínimo de 512 bits (64 bytes)

tempo de transmissão = $5,12 \mu\text{s}$

comprimento < $2,56 \mu\text{s} * \text{velocidade da luz}$

queremos então um atraso de propagação < $2,56 \mu\text{s}$

comprimento < 768m

QUANDO UMA COLISÃO É DETECTADA...

- ▶ Quando o quadro deve ser retransmitido?
- ▶ Imediatamente?
 - ▶ Toda NIC iria começar a transmitir imediatamente
 - ▶ Colisão denovo!
- ▶ Revezamento?
 - ▶ De volta a multiplicação por divisão de tempo

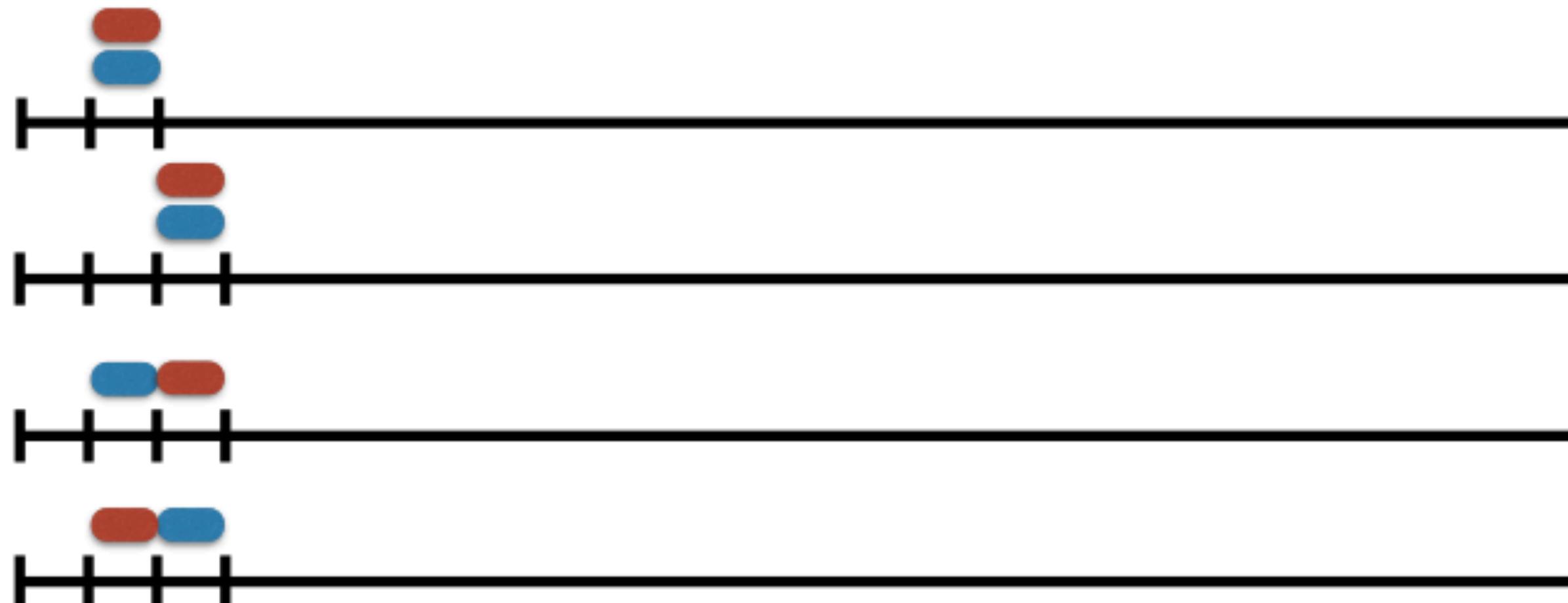
CSMA/CD

- ▶ **Carrier Sense: escutar continuamente o canal**
 - ▶ Se o meio está ocioso: inicia transmissão
 - ▶ Se ocupado: espera até ficar ocioso
- ▶ **Collision Detection: escutar enquanto transmite**
 - ▶ Sem colisão: transmissão completa
 - ▶ Colisão: aborta transmissão; envia sinal de *jam*
- ▶ **Multiple/Random Access: Backoff exponencial após colisão**
 - ▶ Após a colisão, espera um tempo de *backoff*
 - ▶ Após k colisões, escolhe o tempo de espera de $\{0, \dots, 2^{k-1}\}$

CSMA/CD: EXEMPLO



Tentativa #1: suponha que uma colisão ocorra

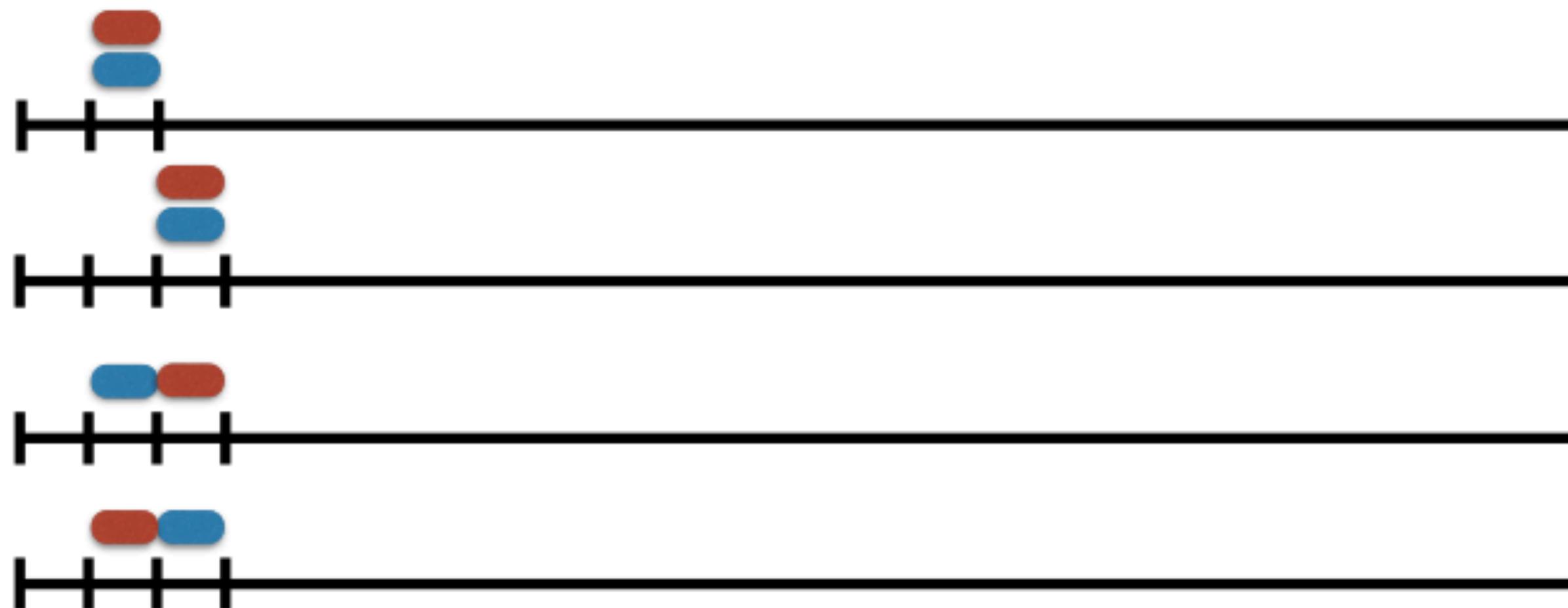


Tentativa #2: Quatro possibilidades $t=\{0, 1\}$
Probabilidade sucesso = 0,5

EXERCÍCIO



Tentativa #1: suponha que uma colisão ocorra



Tentativa #2: Probabilidade de sucesso = 50%

Qual seria a probabilidade de sucesso na tentativa #3?

RESUMO

