

UFCCG  
Universidade Federal  
de Campina Grande




# Redes de Computadores

## Camada de Enlace

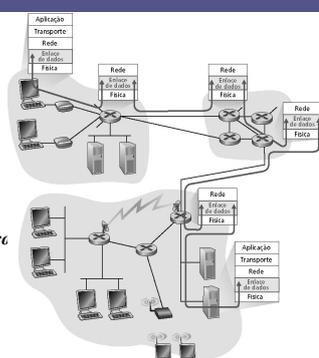
Professor: Reinaldo Gomes  
reinaldo@computacao.ufcg.edu.br

UFCCG

## Camada de enlace: introdução

- Hospedeiros e roteadores são **nós**
- Canais de comunicação que conectam nós adjacentes ao longo do caminho de comunicação são **enlaces**
  - Enlaces guiados (cabeados)
  - Enlaces não guiados (e.g., rádio)
- Entidade de camada 2: **quadro**

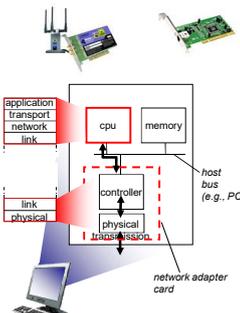
**Camada de enlace tem a responsabilidade de transferir um datagrama de um nó para o nó adjacente sobre um enlace.**



UFCCG

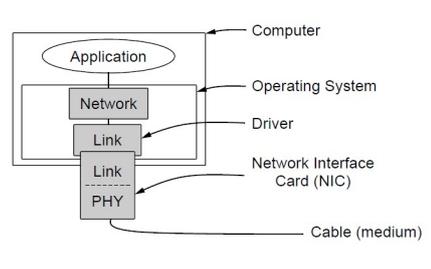
## Camada de enlace: Onde é implementada?

- Em cada um dos hosts da rede
- Camada de enlace é implementada no adaptador (NIC – Network Interface Card)
  - Cartão Ethernet, Adaptador WiFi
  - Implementa enlace e física
- Combinação de hardware, software e firmware



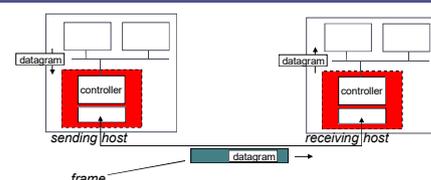
UFCCG

## Camada de enlace: Onde é implementada?



UFCCG

## Camada de enlace: Adaptadores comunicando



- Transmissor:
  - Enquadra o pacote em quadros
  - Realiza verificação de erros, controle de fluxo, retransmissão, etc.
- Receptor:
  - Verifica erros, retransmissão, etc.
  - Extrai o pacote, envia para as camadas superiores

UFCCG

## A camada de enlace: contexto

- Datagrama transferido por protocolos de enlace diferentes sobre enlaces diferentes:
  - ex.: *Ethernet* no primeiro enlace, *frame relay* nos enlaces intermediários, 802.11 no último enlace.
- Cada protocolo de enlace provê serviços diferentes
  - ex.: pode ou não prover transferência confiável sobre o enlace

### Serviços da Camada de Enlace

The diagram illustrates the Data Link Layer Implementations across different network types. It shows the OSI layers: Physical Layer, Data Link Layer, and the Data Link Layer Sublayers (LLC and MAC). For LAN, it lists Ethernet, IEEE 802.3, HDLC, PPP, L2TP, and IEEE 802.2. For WAN, it lists Frame Relay, SIP, HDLC, PPP, L2TP, and SDLC.

### Serviços da Camada de Enlace

- Enquadramento e acesso ao enlace:
  - Encapsula datagramas em quadros acrescentando cabeçalhos e trailer
- Controle de Fluxo
- Verificação de erro e confirmação de recebimento
- Acesso ao canal de comunicação
- Identificação das estações
  - “Endereços físicos” usados nos quadros

### Serviços da Camada de Enlace

- Transferência dados da camada de rede da máquina de origem para a camada de rede do destino
  - Não orientados a conexões e sem reconhecimento
    - Quadros independentes
    - Indicado para taxa de erros muito baixa ou tráfego em tempo real
  - Não orientados a conexões e com reconhecimento
    - Quadros confirmados individualmente
    - Útil em canais não confiáveis (ex.: sistemas sem fio)
  - Orientados a conexões e com reconhecimento
    - Estabelecimento de conexão antes da transferência de dados
    - Quadros confirmados individualmente
    - Garante que cada quadro será recebido uma única vez e na ordem correta

### Serviços da Camada de Enlace

- Controle de fluxo:
  - Limitação da transmissão entre transmissor e receptor
- Detecção de erros:
  - Erros causados pela atenuação do sinal e por ruídos
  - O receptor detecta a presença de erros:
    - Avisa o transmissor para reenviar o quadro perdido
- Correção de erros:
  - O receptor identifica e corrige o(s) bit(s) errado(s) sem recorrer à retransmissão

### Delimitação dos Quadros

□ Contador de caracteres

The diagram shows two scenarios for character counting. (a) shows a sequence of characters: 5 1 2 3 4 5 6 7 8 9 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8 8 9 0 1 2 3. Brackets indicate Frame 1 (5 characters), Frame 2 (5 characters), Frame 3 (8 characters), and Frame 4 (8 characters). (b) shows a similar sequence but with a stuffed '0' character at the end of the first frame, causing an error in the character count for the subsequent frames.

### Delimitação dos Quadros

□ Caracteres de inicialização e finalização, com caracter de preenchimento

The diagram shows three ways to delimit frames. (a) shows a sequence: DLE, STX, A, DLE, B, DLE, ETX. (b) shows a sequence: DLE, STX, A, DLE, DLE, B, DLE, ETX, where the stuffed DLE character is highlighted. (c) shows a sequence: DLE, STX, A, DLE, B, DLE, ETX.

### Delimitação dos Quadros

- Flags de inicialização e finalização, com caracter de enchimento

(a) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0

(b) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 1 0

Stuffed bits

(c) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0

### Detecção e Correção de Erros

### Detecção e Correção de Erros

- Detecção X Correção
  - Meio confiável → **detecção** (+ retransmissão)
  - Meio com muito ruído → **correção**

### Detecção e Correção de Erros

- Verificação de Paridade
  - Paridade com bit único:** Detecta erro de um único bit

		Paridade de linha →			
		$d_{1,1}$	...	$d_{i,j}$	$d_{i,j+1}$
Paridade de coluna ↓	$d_{2,1}$	...	$d_{2,j}$	$d_{2,j+1}$	
	...	...	...	...	
	$d_{i,1}$	...	$d_{i,j}$	$d_{i,j+1}$	
	$d_{i+1,1}$	...	$d_{i+1,j}$	$d_{i+1,j+1}$	

d bits de dados		Bit de paridade	
0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 1		1	
		Nenhum erro	Erro de bit único corrigível
		1 0 1 0 1 1	1 0 1 0 1 1
		1 1 1 1 0 0	1 0 1 1 0 0
		0 1 1 1 0 1	0 1 1 1 0 1
		0 0 1 0 1 0	0 0 1 0 1 0
			Erro de paridade

- Paridade bidimensional:** Detecta e corrige erro de um único bit

### Detecção e Correção de Erros

- Quadro = dados + bits de verificação (*checksum*)

$$n = m + r \quad \text{Palavra do Código}$$

- Código de Hamming
- Código de Redundância Cíclica (CRC)

### Detecção e Correção de Erros

- Código de Hamming
  - Distância de Hamming:
 
$$\begin{array}{r} 10001001 \\ \text{XOR } 10110001 \\ \hline 00111000 \end{array}$$
  - As propriedades de detecção e correção de erros de um código dependem de sua distância de Hamming
    - Detecção:** d erros → distância d + 1
    - Correção:** d erros → distância 2d + 1

**UFCC** Detecção e Correção de Erros

- Código de Hamming
  - ▣  $n = m + r$
  - ▣  $r$  ocupa os bits que são potência de 2
  - ▣  $m$  ocupa os outros bits
  - ▣  $r$  força paridade par

**UFCC** Detecção e Correção de Erros

- Código de Hamming
  - ▣ Numere os bits
  - ▣ Preencha os bits da mensagem
  - ▣ Os bits de verificação resultam de um XOR das posições que influênciam

**UFCC** Detecção e Correção de Erros

- Código de Hamming
  - ▣ Exemplo:
    - $m = 0 \ 1 \ 1 \ 0$
    - $m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4$

$$T(x) = \begin{array}{cccccccc} & 0 & & 1 & 1 & 0 & & \\ \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 2^0 & 2^1 & & & 2^2 & & & 2^3 \\ x^1 & x^2 & m^1 & x^3 & m^2 & m^3 & m^4 & x^4 \end{array}$$

**UFCC** Detecção e Correção de Erros

- Código de Hamming
  - ▣ Exemplo:  $m = 0 \ 1 \ 1 \ 0$

$$x_1 = m_1 \oplus m_2 \oplus m_4 = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1$$

$$x_2 = m_1 \oplus m_3 \oplus m_4 = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1$$

$$x_3 = m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 = 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0$$

**UFCC** Detecção e Correção de Erros

- Código de Hamming
  - ▣ Exemplo:
    - $m = 0 \ 1 \ 1 \ 0$
    - $m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4$

$$T(x) = \begin{array}{cccccccc} & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 2^0 & 2^1 & & & 2^2 & & & 2^3 \\ x^1 & x^2 & m^1 & x^3 & m^2 & m^3 & m^4 & x^4 \end{array}$$

**UFCC** Detecção e Correção de Erros

- Código de Hamming
  - ▣ Exemplo:
    - $T(x) = 1100110$
    - $T(x) = 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0$

**UFCC** **Detecção e Correção de Erros**

- Código de Hamming
  - Exemplo:  $T(x) = \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ x_1 & x_2 & m_1 & x_3 & m_2 & m_3 & m_4 \\ 2^0 & 2^1 & & 2^2 & & & \end{matrix}$

$m_1(3) = 1 + 2 = 2^0 + 2^1 = x_1, x_2$   
 $m_2(5) = 1 + 4 = 2^0 + 2^2 = x_1, x_3$   
 $m_3(6) = 2 + 4 = 2^1 + 2^2 = x_2, x_3$   
 $m_4(7) = 1 + 2 + 4 = 2^0 + 2^1 + 2^2 = x_1, x_2, x_3$

$x_1 = m_1 \oplus m_2 \oplus m_4$   
 $x_2 = m_1 \oplus m_3 \oplus m_4$   
 $x_3 = m_2 \oplus m_3 \oplus m_4$

**UFCC** **Detecção e Correção de Erros**

- Código de Hamming
  - Exemplo:  $T(x) = \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ x_1 & x_2 & m_1 & x_3 & m_2 & m_3 & m_4 \\ 2^0 & 2^1 & & 2^2 & & & \end{matrix}$

	X1	X2	X3
Sem ruído	1	1	0
Ruído em m1	0	0	0
Ruído em m2	0	1	1
Ruído em m3	1	0	1
Ruído em m4	0	0	1
Ruído em m1 e m2	1	0	1

**UFCC** **Detecção e Correção de Erros**

- Código Polinomial ou Código de Redundância Cíclica (CRC)
  - Polinômio:  $110001 \rightarrow x^5 + x^4 + x^0$  (6 bits  $\rightarrow$  grau 5)
- Procedimento no transmissor
  - Seja  $G(x)$  o gerador polinomial de grau  $r$ . Acrescente  $r$  bits 0 ao quadro
  - Divida o novo quadro pelo gerador  $G(x)$
  - Subtraia do quadro original o resto da divisão (sem "vai um")

**UFCC** **Detecção e Correção de Erros**

- Código de Redundância Cíclica (CRC)
  - Exemplo:  $M(x) = 11010110110000$   
 $G(x) = 10011$

$11010110110000 \mid 10011$

**UFCC** **Detecção e Correção de Erros**

- Código de Redundância Cíclica (CRC)

$11010110110000 \mid 10011$   
 $10011 \quad \underline{1100001010}$   
 $10011 \quad \quad \quad 11010110110000$   
 $10011 \quad \quad \quad \quad \quad 1110$   
 $00001 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad T(x) = 11010110111110$   
 $00000$   
 $00010$   
 $\dots$   
 $1110 \leftarrow$  Resto

**UFCC**

Protocolos de acesso a meio compartilhado

## Enlaces de acceso múltiplo e protocolos

- **Ponto-a-ponto:** fio único (e.g., PPP, SLIP)
- **Broadcast (multiponto):** fio ou meio compartilhado:
  - Ethernet tradicional
  - 802.11 LAN sem fio

Compartilhado com fio (por exemplo, Ethernet)

Compartilhado sem fio (por exemplo, Wi-Fi)

Satélite

Coquetel

## Protocolos de acesso múltiplo

- Canal de comunicação único e compartilhado
- Duas ou mais transmissões simultâneas pelos nós: interferência!
  - **Colisão:** um nó recebe dois ou mais sinais simultaneamente!
- **Protocolo de múltiplo acesso:**
  - Algoritmo distribuído que determina como as entidades compartilham o canal; isto é, determinam quando cada estação pode transmitir
  - Comunicação sobre o compartilhamento do canal deve utilizar o próprio canal!
    - Ou seja, nenhum canal fora-de-banda (i.e., out-of-band) para coordenação!

## Protocolo ideal de múltiplo acesso

**Exemplo: canal de broadcast de taxa R bps**

1. Quando um nó quer transmitir, ele pode enviar a uma taxa R.
2. Quando M nós querem transmitir, cada um envia a uma taxa média R/M
3. Totalmente descentralizada:
  - Nenhum nó especial para coordenar transmissões
  - Nenhuma sincronização de relógios e compartimentos
4. Simples

## Protocolos MAC: uma taxonomia

Três grandes classes:

- **Particionamento de canal**
  - Divide o canal em pedaços (i.e., slots) menores : compartimentos de tempo, frequência, etc.
  - Aloca um pedaço para uso exclusivo de cada nó
- **Acesso aleatório**
  - Canal não dividido, permite colisões
  - Necessita mecanismos para "recuperação" das colisões
- **Passagem de permissão**
  - Nós transmitem nos seus turnos (mas com mais volume para enviar podem usar turnos mais longos)

## Protocolos MAC com particionamento de canal: TDMA

**TDMA: acesso múltiplo por divisão temporal**

- Acesso ao canal é feito por "turnos"
- Cada estação controla um compartimento ("slot") de tamanho fixo (tamanho = tempo de transmissão de quadro) em cada turno
- Compartimentos não usados são desperdiçados
- Exemplo: rede local com 6 estações: 1, 3, 4 têm quadros, compartimentos 2, 5, 6 ficam vazios

## Protocolos MAC com particionamento de canal: FDMA

**FDMA: acesso múltiplo por divisão de frequência**

- O espectro do canal é dividido em bandas de frequência
- Cada estação recebe uma banda de frequência
- Tempo de transmissão não usado nas bandas de frequência é desperdiçado
- Exemplo: rede local com 6 estações: 1, 3, 4 têm quadros, as bandas de frequência 2, 5, 6 ficam vazias

bandas de frequência

tempo

### Protocolos de acesso aleatório

- Quando o nó tem um quadro a enviar:
  - Transmite com toda a taxa do canal R.
  - Não há uma regra de coordenação *a priori* entre os nós
- Dois ou mais nós transmitindo -> "colisão",
- Protocolo MAC de acesso aleatório específica:
  - Como detectar colisões
  - Como as estações se recuperam das colisões (ex., via retransmissões atrasadas)
- Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
  - slotted ALOHA
  - ALOHA
  - CSMA e CSMA/CD

### Protocolo ALOHA

- Primeiro protocolo para canais de múltiplo acesso
- Originalmente planejado para sistemas com base stations centrais ou comunicação via satélite
- Usava duas frequências
  - Uplink em 413 MHz e Downlink em 407 MHz, trabalhando a 9600 bps

*O nó central retransmite todos os quadros recebidos*

### Protocolo ALOHA

- A rede é composta por um grande número de estações que transmitem dados em rajadas
- Cada estação transmite um quadro assim que ele é recebido do usuário – não existe qualquer coordenação com as outras estações para que apenas uma envie dados
- O nó central retransmite todos os quadros (tenham sido recebidos corretamente ou não) através de seu canal de down link
- As estações decidem se devem retransmitir baseado nas informações que elas recebem do nó central

### Protocolo ALOHA

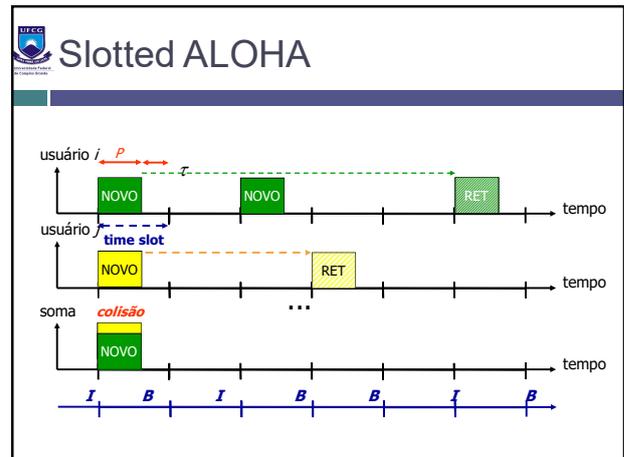
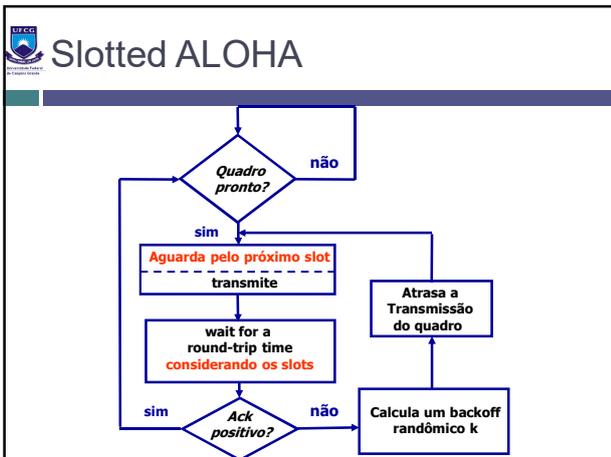
```

    graph TD
        A{Quadro pronto?} -- não --> A
        A -- sim --> B[transmite]
        B --> C[Espera durante round-trip time]
        C --> D{Ack positivo?}
        D -- sim --> A
        D -- não --> E[Calcula um backoff randômico k]
        E --> F[Atraza a Transmissão do quadro]
        F --> B
    
```

### Protocolo ALOHA

### Slotted ALOHA

- O throughput do ALOHA pode ser melhorado se reduzirmos o período em que o quadro se encontra "vulnerável" a interferência de outros quadros
- O Slotted ALOHA trabalha em um canal que é particionado em slots de tempo
- As estações só podem transmitir quadros no início dos slots de tempo
- É necessário que seja realizada a sincronização das estações. Essa sincronização é realizada através da camada física e controlada pela estação central



### CSMA: Carrier Sense Multiple Access

**CSMA:** escuta antes de transmitir:

- Se o canal parece vazio: transmite o quadro
- Se o canal está ocupado, adia a transmissão
- Persistente:
  - Caso o meio estiver ocupado, o nó persiste escutando e quando o meio ficar livre, temos duas possibilidades:
    - 1-Persistente: transmite o quadro (i.e.,  $p$ , probabilidade, igual a 1).
    - P-Persistente: com probabilidade  $P$  transmite e com probabilidade  $1-P$  recua.
- Não Persistente:
  - Calcula tempo de recuo (i.e., *backoff*) e permanece inativo pelo tempo estipulado (tempo de recuo é decrementado somente enquanto o meio estiver LIVRE. Caso o meio ficar ocupado, congela contador até o meio ficar livre novamente. Necessariamente o meio estará livre quando o contador zerar!!!).

### Colisões no CSMA

**Colisões podem ocorrer:**  
o atraso de propagação implica que dois nós quaisquer podem não ouvir as transmissões do outro

**Colisão:**  
todo o tempo de transmissão do quadro é desperdiçado

**Note:**  
papel da distância e do atraso de propagação na determinação da probabilidade de colisão.

The diagram shows a spatial arrangement of nodes A, B, C, and D. Node A starts transmitting at time  $t_0$ . Node B starts transmitting at time  $t_1$ . Due to propagation delay, the signals from A and B overlap at node C, causing a collision. The diagram is labeled 'arranjo espacial dos nós na rede'.

### CSMA/CD (detecção de colisão)

**CSMA/CD:** detecção de portadora como no CSMA

- Colisões **detectadas** num tempo mais curto (proporcional ao tempo de propagação).
- Transmissões com colisões são interrompidas, reduzindo o desperdício do canal
- Detecção de colisão:
  - Fácil em LANs cabeadas: medição da intensidade do sinal, comparação dos sinais transmitidos e recebidos
  - Difícil em LANs sem fio: receptor desligado enquanto transmitindo (e além do mais, colisão acontece no receptor, não no transmissor!!!).
  - Analogia humana: o "bom de papo" educado

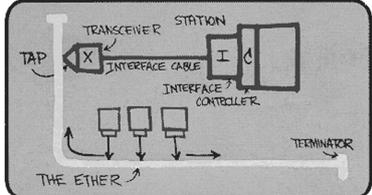
### CSMA/CD (detecção de colisão)

The diagram shows a spatial arrangement of nodes A, B, C, and D. Node A starts transmitting at time  $t_0$ . Node B starts transmitting at time  $t_1$ . The diagram shows the time of detection of collision at node C, where the signals from A and B overlap. The diagram is labeled 'Tempo de detecção de colisão'.

## Ethernet

Tecnologia de rede local "dominante" :

- Primeira tecnologia de LAN largamente usada
- Mais simples e mais barata que LANs com token e ATM
- Velocidade crescente: 10Mbps – 10Gbps



Esboço da Ethernet por Bob Metcalfe

## Ethernet

- **Sem conexão:** não ocorre conexão entre o adaptador transmissor e o receptor.
- **Não confiável:** adaptador receptor não envia ACKs ou nacks para o adaptador transmissor
- O fluxo de datagramas que passa para a camada de rede pode deixar lacunas
- Lacunas serão preenchidas se a aplicação estiver usando TCP.
- Caso contrário, a aplicação verá as lacunas
- Ethernet se baseia no mecanismo do CSMA/CD
- Sem slots de tempo
- Adaptador não transmite se ele detectar algum outro adaptador transmitindo, isto é, **carrier sense**
- O adaptador transmissor aborta quando detecta outro adaptador transmitindo, isto é, **collision detection**
- Antes de tentar uma retransmissão, o adaptador espera um período aleatório, isto é, **random access**

## Quadro Ethernet

Adaptador do transmissor encapsula o datagrama IP (ou outro pacote de protocolo da camada de rede) num **quadro Ethernet**

Preâmbulo	Endereço de destino	Endereço da origem	Tipo	Dados	CRC
-----------	---------------------	--------------------	------	-------	-----

**Preâmbulo:**

- 7 bytes com padrão 10101010 seguido por um byte com padrão 10101011
- **usado para sincronizar as taxas de relógio do transmissor e do receptor**

## Quadro Ethernet

- **Endereços:** 6 Bytes
  - Se o adaptador recebe um quadro com endereço de destino coincidente, ou com endereço de broadcast (ex., pacote ARP), ele passa o dado no quadro para o protocolo da camada de rede
- **Tipo:** indica o protocolo da camada superior; geralmente é o protocolo IP, mas outros podem ser suportados, tais como Novell IPX e AppleTalk)
- **CRC:** verificado no receptor; se um erro é detectado, o quadro é simplesmente descartado

Preâmbulo	Endereço de destino	Endereço da origem	Tipo	Dados	CRC
-----------	---------------------	--------------------	------	-------	-----

## CSMA/CD do Ethernet

1. Adaptador recebe um datagrama da camada de rede e cria um quadro.
2. Se o adaptador detecta um canal livre, ele começa a transmitir o quadro. Se ele detecta o canal ocupado, espera até ele ficar livre e então transmite.
3. Se o adaptador transmite o quadro todo sem detectar outra transmissão, sua missão com esse quadro está cumprida!
4. Se o adaptador detecta outra transmissão enquanto transmite, ele aborta e envia um *jam signal*
5. Após abortar, o adaptador entra em **exponential backoff**: após a m-ésima colisão, o adaptador escolhe um K aleatório de  $\{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\}$ . O adaptador espera K\*512 tempos de bit e retorna ao passo 2.

## CSMA/CD do Ethernet

**Jam signal:** garante que todos os outros transmissores estão cientes da colisão; 48 bits;

**Bit time:** .1 microseg para Ethernet de 10 Mbps; para K=1023, o tempo de espera é cerca de 50 mseg

**Exponential backoff:**

- **Objetivo:** adaptar tentativas de retransmissão para carga atual da rede
  - Carga pesada: espera aleatória será mais longa
- Primeira colisão: escolha K entre  $\{0, 1\}$ ; espera é K x 512 tempos de transmissão de bit
- Após a segunda colisão: escolha K entre  $\{0, 1, 2, 3\}$ ...
- Após 10 ou mais colisões, escolha K entre  $\{0, 1, 2, 3, 4, \dots, 1023\}$

### IEEE 802.11 LAN sem fio

- **802.11b**
  - 2,4 GHz faixa de rádio sem licença
  - Até 11 Mbps
  - *Direct sequence spread spectrum* (DSSS) na camada física
    - Todos os hospedeiros usam a mesma seqüência de código
  - Largamente empregado, usando estações-base (pontos de acesso)
- **802.11a**
  - Faixa 5 GHz
  - Até 54 Mbps
- **802.11g**
  - Faixa 2,4 GHz
  - Até 54 Mbps
  - Todos usam CSMA/CA para acesso múltiplo
  - Todos têm estações-base e versão para redes ad hoc

### 802.11 arquitetura de LAN

- Hospedeiro sem fio se comunica com a estação-base
- Estação-base = ponto de acesso (AP)
- Basic Service Set (BSS) (ou “célula”) no modo infraestrutura contém:
  - Hospedeiros sem fio
  - Ponto de acesso (AP): estação-base
  - Modo ad hoc: somente hospedeiros

### 802.11: Canais, associação

- 802.11b: o espectro de 2,4 GHz-2,485 GHz é dividido em 11 canais de diferentes frequências
- O administrador escolhe a frequência para o AP
- Possível interferência: canal pode ser o mesmo que aquele escolhido por um AP vizinho!

Gráfico de Frequência dos Canais em GHz

- **Hospedeiro:** deve associar-se com um AP
  - Percorre (scanning) canais, buscando quadros beacon que contêm o nome do AP (SSID) e o endereço MAC
    - Escolhe um AP para se associar
    - Pode realizar autenticação

### IEEE 802.11: acesso múltiplo

- Evita colisões: 2 ou mais nós transmitindo ao mesmo tempo
- 802.11: CSMA - escuta antes de transmitir
  - Não colide com transmissões em curso de outros nós
- 802.11: não faz detecção de colisão!
  - Difícil de receber (sentir as colisões) quando transmitindo devido ao sinal recebido ser muito fraco (desvanecimento)
  - Pode não perceber as colisões: colisão acontece no receptor!!!h
  - Meta: evitar colisões: CSMA/C (collision)(avoidance)

### IEEE 802.11 Protocolo MAC: CSMA/CA

**Transmissor 802.11**

1. Se o canal é percebido quieto (idle) por DIFS então
  - Transmite o quadro inteiro (sem CD).
2. Se o canal é percebido ocupado, então
  - Inicia um tempo de backoff aleatório
  - Temporizador decrementa contador enquanto o canal estiver ocioso
  - Transmite quando temporizador expira
  - Se não recebe ACK, aumenta o intervalo de recuo (backoff) aleatório; repete passo 2.

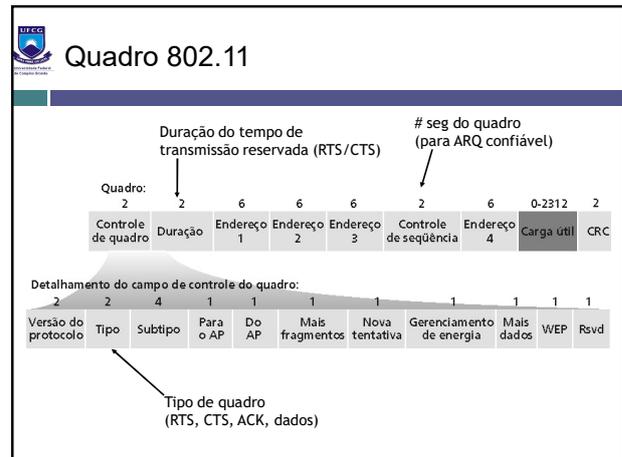
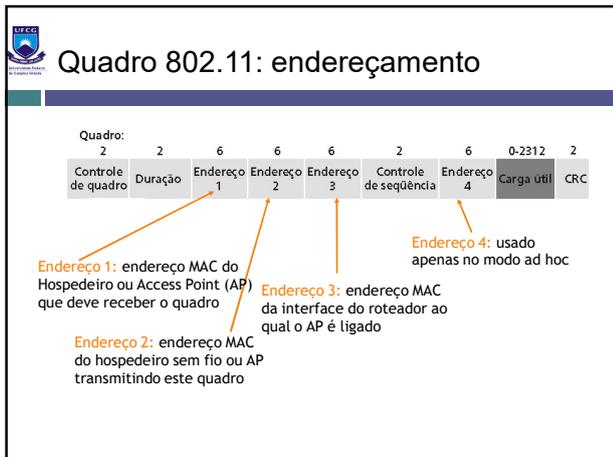
**Receptor 802.11**

- Se o quadro é recebido corretamente retorna ACK depois de SIFS (ACK é necessário devido ao problema do terminal oculto)

### Evitando colisões

**Idéia:** permite o transmissor “reservar” o canal em vez de acessar aleatoriamente ao enviar quadros de dados: evita colisões de quadros grandes

- Transmissor envia primeiro um pequeno quadro chamado **request to send** (RTS) à estação-base usando CSMA
  - RTSs podem ainda colidir uns com os outros, mas são pequenos
- BS envia em **broadcast clear to send** CTS em resposta ao RTS
  - CTS é ouvido por todos os nós
  - Transmissor envia o quadro de dados
  - Outras estações deferem suas transmissões
  - Após recepção do quadro, destinatário envia confirmação (i.e., ACK).



### Protocolos MAC com passagem de permissão

**Protocolos MAC com particionamento de canais:**

- Compartilham o canal eficientemente quando a carga é alta e bem distribuída
- Ineficiente nas cargas baixas: atraso no acesso ao canal. A estação consegue uma banda de 1/N da capacidade do canal, mesmo que haja apenas 1 nó ativo!

**Protocolos MAC de acesso aleatório**

- Eficiente nas cargas baixas: um único nó pode usar todo o canal
- Cargas altas: excesso de colisões

**Protocolos de passagem de permissão**  
Buscam o melhor dos dois mundos!

### Protocolos MAC com passagem de permissão

**Polling:**

- Nó mestre “convida” os escravos a transmitirem um de cada vez
- Problemas:
  - Polling overhead
  - Latência
  - Ponto único de falha (mestre)

**Token passing:**

- Controla um **token** passado de um nó a outro seqüencialmente.
- Mensagem *token*
- Problemas:
  - *Token overhead*
  - Latência
  - Ponto único de falha (token)

### Sumário dos protocolos MAC

- Como se faz com um canal compartilhado?
  - Particionamento de canal, no tempo, por frequência ou por código
  - Particionamento aleatório (dinâmico),
    - ALOHA, Slotted-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
    - Detecção de portadora: fácil em alguns meios físicos (e.g., cabos) e difícil em outros (e.g., wireless)
    - CSMA/CD usado na rede *Ethernet*
    - CSMA/CA (Collision Avoidance) usado em 802.11 mode *ad hoc*
- Passagem de permissão
  - *Polling* a partir de um nó central, passagem de token

### Endereçamento da camada de enlace

## Endereços de LAN e ARP

**Endereços IP de 32-bit:**

- Endereços da *camada de rede*
- Usados para levar o datagrama até a rede de destino (lembre-se da definição de rede IP)

**Endereço de LAN (ou MAC ou físico):**

- Usado para levar o datagrama de uma interface física a outra fisicamente conectada com a primeira (isto é, na mesma rede)
- Endereços MAC com 48 bits (na maioria das LANs) gravados na memória fixa (ROM) do adaptador de rede

## Endereços de LAN e ARP

- A alocação de endereços MAC é administrada pelo IEEE
- O fabricante compra porções do espaço de endereço MAC (para assegurar a unicidade)
- Analogia:
  - (a) endereço MAC: semelhante ao número do RG
  - (b) endereço IP: semelhante a um endereço postal
- Endereçamento MAC é “flat” => portabilidade
  - É possível mover uma placa de LAN de uma rede para outra sem reconfiguração de endereço MAC
- Endereçamento IP “hierárquico” => NÃO portátil
  - Depende da rede na qual se está ligado

## ARP: Address Resolution Protocol (Protocolo de resolução de endereços)

**Questão: como determinar o endereço MAC de B dado o endereço IP de B?**

- Cada nó IP (hospedeiro, roteador) numa LAN tem um módulo e uma tabela ARP
- Tabela ARP: mapeamento de endereços IP/MAC para alguns nós da LAN < endereço IP; endereço MAC; TTL >
- < IP address; MAC address; TTL >
- TTL (Time To Live): tempo depois do qual o mapeamento de endereços será esquecido (tipicamente 20 min)

## ARP: Address Resolution Protocol (Protocolo de resolução de endereços)

a. ARP request is broadcast

b. ARP reply is unicast

## ARP: Address Resolution Protocol (Protocolo de resolução de endereços)

Case 1. A host has a packet to send to another host on the same network.

Case 2. A host wants to send a packet to another host on another network. It must first be delivered to a router.

Case 3. A router receives a packet to be sent to a host on another network. It must first be delivered to the appropriate router.

Case 4. A router receives a packet to be sent to a host on the same network.

## ARP na mesma rede local

- A que enviar um datagrama para B, e o endereço MAS de B não está na tabela ARP de A
- A faz **broadcast** de pacote de consulta ARP, contendo o endereço IP de B
  - end. MAC de destino = FF-FF-FF-FF-FF-FF
  - todas as máquinas na LAN recebem a consulta ARP
- B recebe o pacote ARP, responde para A com seu endereço MAC (de B).
  - Quadro enviado para o end. MAC de A (unicast)
- A faz um cache (salva) o par de endereços IP para MAC em sua tabela ARP até que a informação se torne antiga (expirada) soft state: informação que expira (é descartada) sem atualização
- ARP é “plug-and-play”:
  - Nós criam suas tabelas ARP sem intervenção do administrador da rede



## Roteamento e ARP

objetivo: **envia datagrama de A para B via R**  
supõe que A conhece o endereço IP de B

- Duas tabelas ARP no roteador R, um para cada rede IP (LAN)



- A cria o pacote IP com origem A, destino B
- A usa ARP para obter o endereço de camada física de R correspondente ao endereço IP 111.111.111.110
- A cria um quadro Ethernet com o endereço físico de R como destino, o quadro Ethernet contém o datagrama IP de A para B
- A camada de enlace de A envia o quadro Ethernet
- A camada de enlace de R recebe o quadro Ethernet
- R remove o datagrama IP do quadro Ethernet, verifica que ele se destina a B
- R usa ARP para obter o endereço físico de B
- R cria quadro contendo um datagrama de A para B e envia para B