

Redes de Computadores 1

Prof. Miguel Elias Mitre Campista

<http://www.gta.ufrj.br/~miguel>

Parte IV

Camada de Enlace: Protocolos de Comunicação

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Camada de Enlace

- Relembrando...
 - 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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Camada de Enlace

- Por que a lembrança dos tipos de canal é importante?
- O tipo de canal teria alguma influência sobre o protocolo de comunicação?

A resposta é SIM!
Principalmente em um canal de difusão, o acesso ao meio precisa ser controlado.

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Protocolos de Janela Deslizante

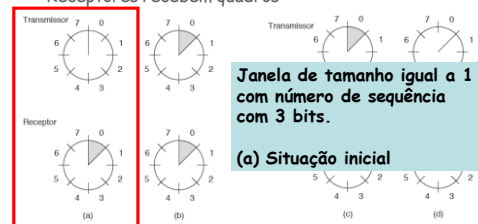
- Enviam quadros identificados por números de sequência
 - Pode variar de 0 até um valor máximo
 - Valor máximo = $2^n - 1$, onde n é o número de bits
- Transmissores mantêm um conjunto de números de sequência relacionados a quadros que ele pode enviar
 - Quadros pertencem à janela de transmissão
- Receptores também mantêm um conjunto de números de sequência relacionados a quadros que pode aceitar
 - Quadros pertencem à janela de recepção

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

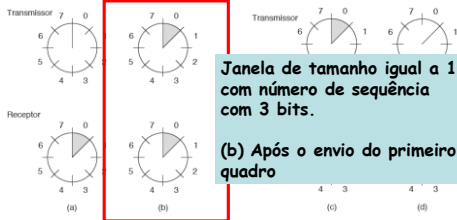
Protocolos de Janela Deslizante

- Conjunto de números de sequência é alterado à medida que:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



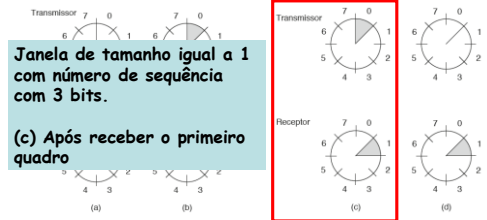
Protocolos de Janela Deslizante

- Conjunto de números de seqüência é alterado à medida que:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



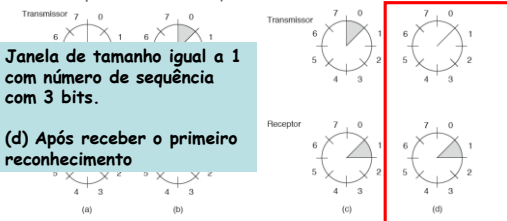
Protocolos de Janela Deslizante

- Conjunto de números de seqüência é alterado à medida que:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



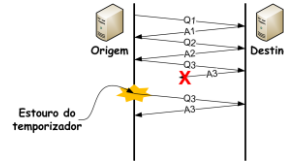
Protocolos de Janela Deslizante

- Conjunto de números de seqüência é alterado à medida que:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



Tipos de Protocolos

- Pare e Espere (Stop-and-Wait)**
 - Transmissor só pode enviar um quadro por vez
 - Janela de transmissão e de recepção são iguais a 1
 - Próximo quadro só pode ser transmitido após a recepção do reconhecimento positivo (ACK) do atual



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

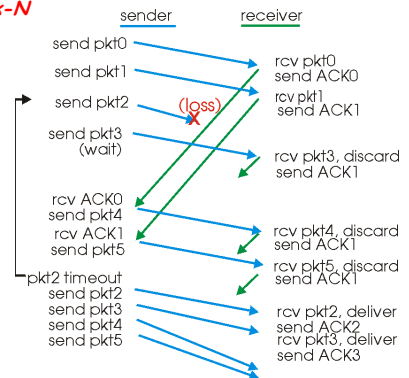
Tipos de Protocolos

- 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 seqüência
 - Transmissor possui um temporizador para o pacote mais antigo ainda não reconhecido
 - Se o temporizador estourar, retransmite todos os pacotes ainda não reconhecidos

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Go-Back-N



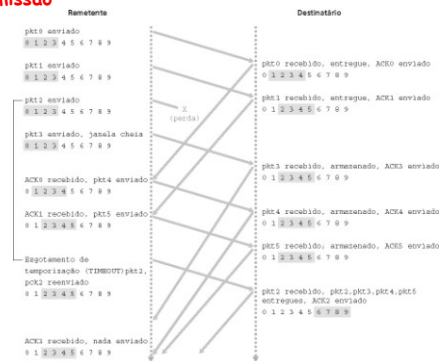
Tipos de Protocolos

- 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
 - Números de sequência consecutivos
 - Outra vez limita números de sequência de pacotes enviados, mas ainda não reconhecidos

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Retransmissão Seletiva



Protocolos de Camada de Enlace: Canal Ponto-a-Ponto

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Controle de Enlace de Dados Ponto-a-Ponto

- Canal ponto-a-ponto
 - Um transmissor, um receptor, um canal
 - Mais fácil que um canal de difusão
 - Sem controle de acesso ao meio (MAC)
 - Sem necessidade de endereçamento MAC explícito
 - Entretanto, precisa de enquadramento, controle de fluxo, detecção e correção de erro etc.
 - Ex.: canal discado, canal ISDN/RDSI
- Protocolos: HDLC e PPP

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

HDLC

- Controle de enlace de dados de alto nível (*High-level Data Link Control*)
 - Enquadramento e detecção de erros
 - Usado no X.25
- Orientado a conexão
- Orientado a bits
 - Não se preocupam com o número de bytes do quadro

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

HDLC

- Usa a técnica de inserção de bits
 - Evita que sequências de delimitação de quadros apareçam no campo de informação
- Usa um protocolo de janela deslizante do tipo *Go-Back-N* ou Retransmissão Seletiva
 - Semelhante aos mecanismos do TCP

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

HDLC: Formato do Quadro

- *Flags* inicial e final: Sequência 01111110
- Endereço
- Controle
 - Números de sequência, confirmações, outros
- Dados
 - Sem limite de tamanho
- Verificação
 - Variação do CRC



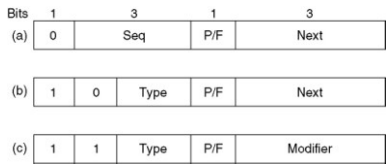
Fonte: Tanenbaum

HDLC: Tipos de Quadros

- Três tipos
 - Informação
 - Dados
 - Supervisor
 - Controle de fluxo ou de erro, quando não é possível fazer piggyback no quadro de dados
 - Não-numerado
 - Vários propósitos, inclusive para envio de dados ou controle
- Tipos de quadros se diferenciam no campo controle

HDLC: Tipos de Quadros

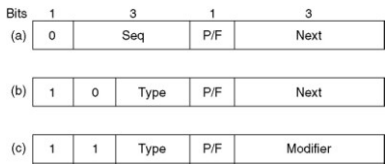
Campos de controle dos diferentes tipos de quadros (fonte: Tanenbaum)



(a) Informação (b) Supervisor (c) Não-numerado

HDLC: Tipos de Quadros

Campos de controle dos diferentes tipos de quadros (fonte: Tanenbaum)

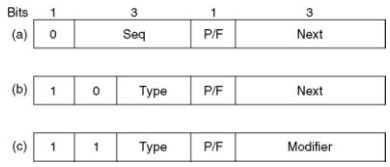


(a) Informação (b) Supervisor (c) Não-numerado

Poll/Final: Poll é usado quando uma estação quer receber uma resposta de outra e o Final é usado para indicar uma resposta ou um final de transmissão

HDLC: Tipos de Quadros

Campos de controle dos diferentes tipos de quadros (fonte: Tanenbaum)



(a) Informação (b) Supervisor (c) Não-numerado

Seq: é o número de sequência do quadro
Next: indica o próximo quadro esperado
Type/Modifier: indicam o tipo do quadro

PPP

- Protocolo Ponto-a-Ponto (*Point-to-Point Protocol*)
- Protocolo de enlace usado em linhas ponto-a-ponto na Internet
 - Mais simples que o HDLC
 - Orientado a caracteres e não a bits como o HDLC
 - Usado frequentemente em:
 - Conexões de linhas privadas entre roteadores
 - Conexões de acesso entre estações de usuários domiciliares e roteadores
- Definido nas RFCs 1661 a 1663 e em outros

PPP

- Usa a técnica de inserção de bytes de *flags* em linhas de discagem por modem
 - PPP pode usar linhas SONET, linhas HDLC orientadas a bits, circuitos RDSI e outros
- Possui dois modos de transmissão
 - Não confiável
 - Sem números de sequência e confirmações
 - Confiável
 - Raramente usado

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

PPP

- Possui três funções principais
 1. Enquadramento e detecção de erros
 2. Ativação, teste, negociação e desativação de linhas
 - Através do protocolo de controle de enlace (*Link Control Protocol - LCP*)
 - Ex.: negociação da taxa de transmissão, tamanho máximo da carga útil
 3. Negociação de opções da camada rede independente do protocolo de rede utilizado
 - Através do protocolo de controle de rede (*Network Control Protocol - NCP*)
 - Ex.: definição de endereços IP

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

PPP: Requisitos do Projeto

- Detecção de erro
- Vida da conexão
 - Detecta, indica falhas do enlace para a camada de rede
- Negociação do endereço da camada de rede
 - Pontos terminais podem aprender/configurar o endereço de rede do outro

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

PPP: Requisitos do Projeto

- Enquadramento do pacote
 - Encapsula datagramas da camada de rede em quadro da camada de enlace
 - Transporta dados da camada de rede de qualquer protocolo de camada de rede (não apenas do IP), simultaneamente
- Transparência
 - Transporta qualquer padrão de bits no campo de dados
- Múltiplos protocolos de rede e tipos de enlace

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

PPP: Requisitos do Projeto

- Ser o mais simples possível
 - Não faz correção/recuperação de erros
 - Sem controle de fluxo
 - Sem controle de sequenciamento
 - Sem necessidade de dar suporte a canais de difusão

Recuperação de erros, controle de fluxo e reordenamento dos dados foram deixados para camadas superiores...

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

PPP: Formato do Quadro

- *Flags* inicial e final: Sequência 01111110
 - Endereço
 - O único valor é o 11111111
 - Todas as estações aceitam esse endereço
 - Controle
 - Para quadros não numerados é 00000011
- Foram incluídos para futuros valores diferentes

Bytes	1	1	1	1 ou 2	Variável	2 ou 4	1
	Flag	Endereço	Controle	Protocolo	Carga útil	Checksum	Flag
	01111110	11111111	00000011				01111110

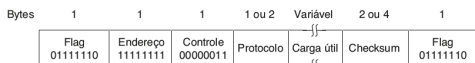
Fonte: Tanenbaum

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

PPP: Formato do Quadro

- Protocolo
 - Tipo de pacote da carga útil (ex., o protocolo IP)
- Carga útil
 - Possui um tamanho máximo negociado (LCP)
 - Padrão é 1500 octetos
 - Byte de escape é 01111101 (problema da sequência do flag no meio do quadro)
- Verificação: CRC

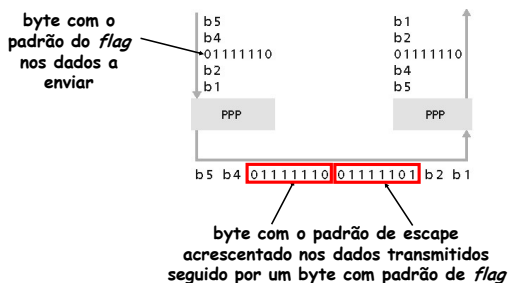


Fonte: Tanenbaum

PPP: Enchimento (Byte Stuffing)

- Requisito de "transparência dos dados"
 - Carga útil pode conter o padrão do flag 01111110
 - Se um 01111110 for recebido, ele é dados ou flag?
- Transmissor
 - Adiciona ("enche") um byte de controle de escape 01111101 antes de cada byte 01111110 de dados
- Receptor
 - Se encontrar um 01111110 precedido de um 01111101
 - Descarta o primeiro byte e continua a recepção dos dados
 - Se houver apenas um único 01111110 → byte de flag

PPP: Enchimento (Byte Stuffing)



PPP: Funcionamento

Antes de trocar dados da camada de rede, os parceiros do enlace de dados devem...

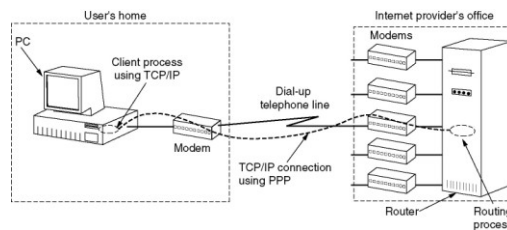
1. Configurar o enlace PPP
 - Compr. máx. quadro, etc.
 - Autenticação
2. Obter/configurar informações da camada de rede
 - Para IP: transporta mensagens do Protocolo de Controle IP (IPCP) para configurar/obter o endereço IP
3. Aberto
 - Transporta dados

PPP: Funcionamento Domiciliar

- Exemplo de uso domiciliar:
 - Estação "chama" o roteador do ISP através de um modem
 - Após o estabelecimento de uma conexão física, a estação envia quadros LCP em um ou mais quadros PPP
 - Selecionam os parâmetros PPP a serem usados
 - Envia pacotes NCP
 - Em geral obtém endereço IP
 - Desconexões ocorrem na "ordem inversa"
 - Rede (NCP), enlace (LCP) e física (modem desliga o telefone)

PPP: Funcionamento Domiciliar

Conexão através de um usuário domiciliar (fonte: Tanenbaum)



PPPoE: PPP over Ethernet

- Conexões PPP tradicionais:
 - Estabelecidas entre duas estações conectadas através de um enlace ponto-a-ponto
 - Não há dúvidas que um quadro enviado por uma estação vá alcançar a outra
- Conexões PPP em redes Ethernet:
 - Uma estação pode alcançar todas as estações na rede
 - Nesse caso, quem seria o provedor de acesso?

PPPoE adiciona um estágio de descobrimento da estação do provedor de acesso, antes da sessão PPP. Dessa forma, as duas estações passam a conhecer o endereço MAC uma da outra

Protocolos de Camada de Enlace: Canal de Difusão

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

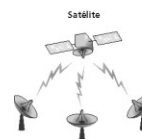
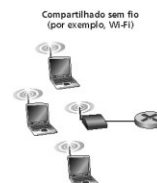
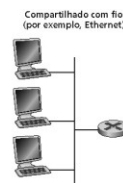
Controle de Acesso ao Meio

- 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 faixa para coordenar a transmissão

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Enlaces e Protocolos de Acesso Múltiplo



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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...

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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) para coordenar as transmissões e se tornar um ponto de falha
 4. O protocolo é simples para que sua implementação seja barata

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Classes de Protocolos de Acesso Múltiplo

- 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 Acesso Aleatório
 - Canal não é dividido, podem ocorrer colisões
 - "Recupera" as colisões
- Protocolos de Revezamento
 - Nós se revezam no acesso ao meio
 - Alterna oportunidades de acesso ao meio sem que ninguém tente acessar ao mesmo tempo

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Protocolos de Divisão do Canal

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Protocolos de Divisão do Canal

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

TDMA

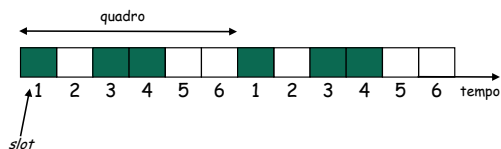
- Acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access*)
- Acesso múltiplo feito em função do tempo
- Tempo é dividido em *slots*
 - Geralmente de tamanho fixo e igual ao tempo para transmitir um pacote
- Em cada *slot* somente uma estação pode transmitir
 - Acesso ao canal em "turnos"

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

TDMA

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

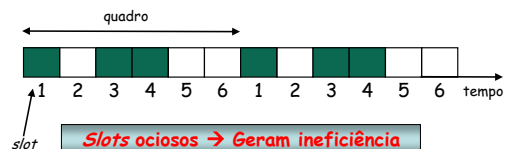


EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

TDMA

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



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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*)

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Duplexação

- Tipo especial de multiplexação
- Comunicação entre duas estações pode ser classificada em:
 - *Simplex* → único sentido
 - *Half-duplex* → dois sentidos, porém 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*)

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Protocolos de Acesso Aleatório

- 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 especifica:
 - Como detectar colisões e como se recuperar delas
 - Através de retransmissões retardadas, por exemplo

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Protocolos de Acesso Aleatório

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Rede Aloha

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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 através do não recebimento do reconhecimento positivo em um tempo
 - Se o quadro for recebido com erro
 - Remetente também não recebe reconhecimento positivo

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Protocolo Aloha

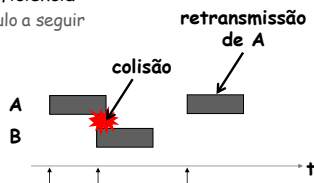
- Se o reconhecimento positivo não for recebido...
 - Quadro é retransmitido...
 - **Retransmissão após a tempo aleatório para redução da probabilidade de nova colisão**
 - Processo é repetido continuamente até que o reconhecimento seja recebido pelo remetente

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Protocolo Aloha

- Baixa eficiência
 - Cálculo a seguir

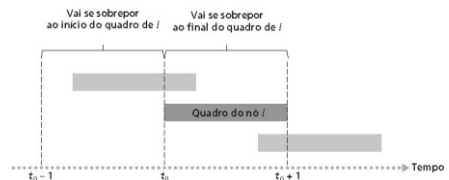


EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Eficiência do Aloha

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

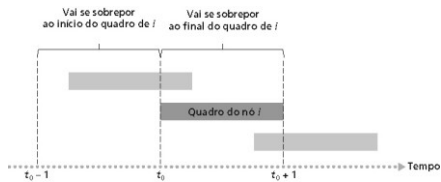


EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Eficiência do Aloha

- $P(\text{sucesso por um dado nó}) = C_{n,1} \times P(\text{nó transmite}) \times P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0-1, t_0]) \times P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0, t_0+1])$



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ Professor Miguel Campista

Eficiência do Aloha

- $P(\text{sucesso por um dado nó}) = C_{n,1} \times P(\text{nó transmite}) \times P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0-1, t_0]) \times P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0, t_0+1])$



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



Eficiência baixa...

$P(\text{sucesso por um dado nó}) = 1/2e \approx 18\%$
Considerando p ótimo e n tendendo ao infinito...

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ Professor Miguel Campista

Eficiência do Aloha

- Cálculo do p ótimo (p^*):

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

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

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

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

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

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

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

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ Professor Miguel Campista

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 para que saibam onde os intervalos começam
 - Se dois ou mais nós transmitirem em um *slot*, todos os nós envolvidos deixam de receber um reconhecimento

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ Professor Miguel Campista

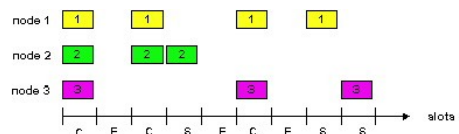
Slotted Aloha

- 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 (percebida antes do final do intervalo), o nó retransmite o quadro em intervalo subsequente com **probabilidade p** até obter sucesso

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ Professor Miguel Campista

Slotted Aloha

- Operação



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ Professor Miguel Campista

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Slotted Aloha

- Desvantagens
 - Quando há colisões → *slots* desperdiçados
 - *Slots* ociosos → desperdício
 - Retransmissões em *slots* aleatórios podem gerar *slots* ociosos
 - Requer a sincronização dos relógios

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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
 - $np(1-p)^{n-1}$

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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 = $1/e \approx 37\%$

Mais eficiente, mas ainda é baixa!

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Eficiência do Slotted Aloha

- Cálculo do p ótimo (p^*):

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

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

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

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

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

$$\Rightarrow 1 = p^* \cdot n \Rightarrow p^* = 1/n$$
- Substituindo p^* em $np(1-p)^{n-1}$:

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

$$\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^n] / \lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)] = 1/e = 37\%$$
 - Lembrando que $\lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^n] = 1/e$

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

- Uso de **detecção 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 → detecção de portadora
 - Se alguém começa a falar junto de você, pare de falar → detecção de colisão

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA X Aloha

- Aloha não escuta o meio
- Aloha não pára a transmissão caso detecte uma colisão

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Tipos de CSMA

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Colisão de Quadros

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

Sim!
Mas por quê?

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

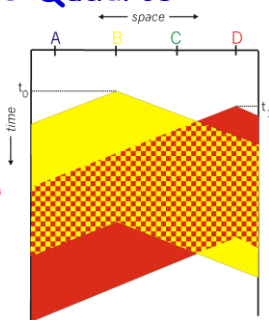
Professor Miguel Campista

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!



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Colisão de Quadros

Inferida

- Através do não recebimento de um reconhecimento positivo em um tempo T
 - CSMA persistente
 - CSMA não-persistente
 - CSMA p-persistente
 - CSMA/CA (Collision Avoidance)

Detectada

- CSMA/CD (Collision Detection)

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

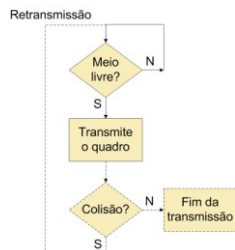
CSMA Persistente

- 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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA Persistente



Pode haver nova colisão após o meio ficar livre!

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

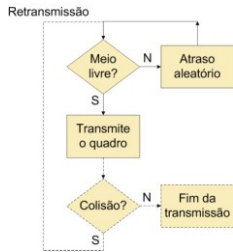
CSMA Não-persistente

- 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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA Não-persistente



Evita colisão após o meio ficar livre...

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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*

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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 (trata como se uma colisão tivesse acontecido)
 - Se o meio estiver ocupado \rightarrow Espera pelo próximo *slot* e repete o algoritmo

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

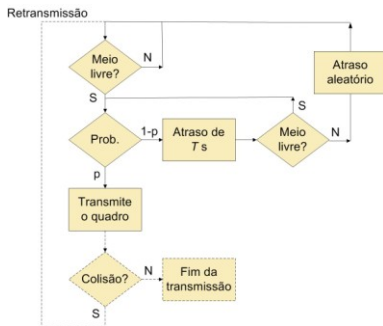
CSMA p-persistente

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

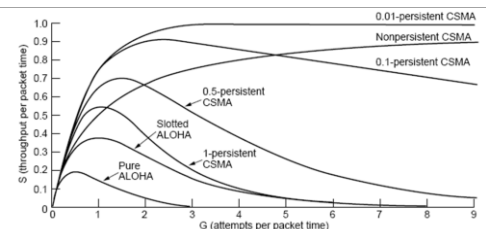
Professor Miguel Campista

CSMA p-persistente



Eficiência

Utilização do canal x carga (fonte: Tanenbaum)



O eixo Y descreve a vazão e o eixo X descreve o tráfego oferecido para a rede (número de nós com pacote para transmitir).

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!

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- Escuta de portadora
 - Como o CSMA persistente
- Detecção de colisão
 - Informação da colisão enviada para todas as estações tomarem conhecimento
 - Reforço de colisão (jam)
 - Diminui-se a duração dos efeitos das colisões

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- Caso haja colisão...
 - Nova tentativa de transmissão após um tempo aleatório
 - Semelhante ao CSMA 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

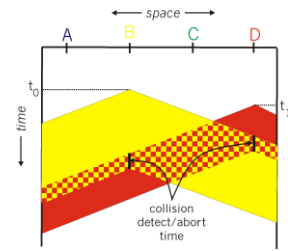
EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- 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

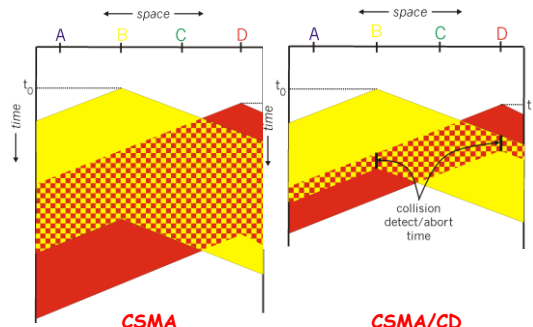
Colisão!



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

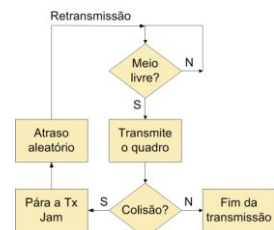
CSMA vs. CSMA/CD



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- Problema:
 - Como garantir que todas as estações detectem colisões?

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- Problema:
 - Como garantir que todas as estações detectem colisões?
- Solução:
 - Meio tem que ficar ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - Quadro possui um tamanho mínimo
 - Porque a colisão é detectada pelos transmissores durante o envio dos quadros

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - A transmite um quadro em $t = 0$



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - B começa a transmitir em $\tau - \epsilon$



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - Colisão detectada por B (na transmissão)
 - B interrompe a transmissão e envia o *jam*

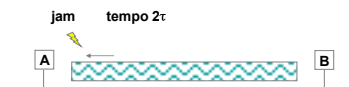


EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - *Jam* chega a A em 2τ
 - A interrompe a sua transmissão
 - Conclusão: existe um tamanho de quadro mínimo



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CD

- Mais detalhes quando falarmos do padrão Ethernet

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

CSMA/CA

- Veremos quando falarmos do padrão de redes sem-fio IEEE 802.11

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Protocolos de Revezamento

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Revezamento → unir o melhor dos dois mundos!

Protocolos de Revezamento

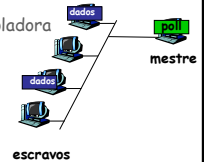
- Varredura (*polling*)
- Reserva
- Passagem de ficha de permissão (*token*)
- Outros

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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 armazenada na estação controladora
- Desvantagens
 - Introduz um atraso de seleção
 - Sobrecarga de controle
 - Ponto único de falha



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Reserva

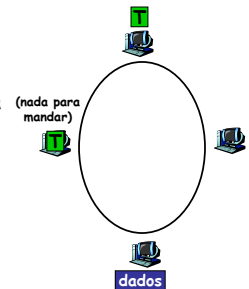
- Estações reservam o direito de acessar o meio compartilhado
- Pedidos de reserva são enviados pelas estações
 - Processados pela estação centralizadora que escalona o posterior acesso ao meio
 - Dependendo do protocolo, pode haver colisões de pedidos

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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

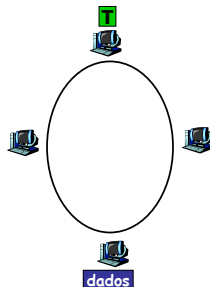


EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

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



EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Resumo dos Protocolos MAC

- Divisão do canal por tempo, frequência ou código
 - Divisão de Tempo, Divisão de Frequência
- Acesso Aleatório
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - Escuta da portadora:
 - Fácil em algumas tecnologias (cabeadas), mas difícil em outras (sem fio)
 - CSMA/CD usado no Ethernet
 - CSMA/CA usado no IEEE 802.11 (WiFi)
- Revezamento
 - Varredura (*polling*) a partir de um ponto central, reserva, passagem de permissões

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Modelos

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Modelo IEEE 802

- Padronização de redes locais e metropolitanas
 - Usada em várias tecnologias
- Arquitetura baseada no modelo OSI
 - Subcamada de enlace lógico (LLC)
 - Provê serviços de comunicação de quadro
 - Controle de fluxo
 - Controle de erros

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

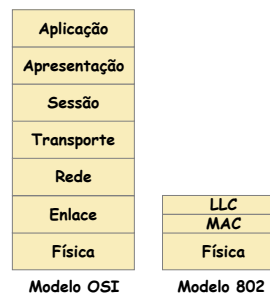
Modelo IEEE 802

- Arquitetura baseada no modelo OSI (cont.)
 - Subcamada de controle de acesso ao meio (MAC)
 - Controle do acesso a um meio compartilhado
 - Enquadramento
 - Endereçamento
 - Detecção de erros
 - Camada física
 - Provê serviços de transmissão e recepção de bits
 - Interfaces elétricas e mecânicas
 - Características de sincronização
 - Especificação do meio de transmissão

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Modelo IEEE 802 Vs. Modelo OSI



Modelo IEEE 802

- Subcamada de acesso ao meio e a camada física
 - Determinam uma tecnologia de rede pessoal, local ou metropolitana
 - IEEE 802.3: rede local em barramento
 - Pequenas diferenças entre o Ethernet e o IEEE 802.3
 - IEEE 802.4: rede local em barramento com ficha de permissão (Token Bus)
 - IEEE 802.5: rede local em anel com ficha de permissão (Token Ring)
 - IEEE 802.11: rede local sem fio (Wi-Fi)

EEL878: Redes de Computadores 1 – Del-Poli/UFRJ

Professor Miguel Campista

Modelo IEEE 802

Padrões IEEE 802 (fonte: Tanenbaum)

Number	Topic
802.1	Overview and architecture of LANs
802.2 ↓	Logical link control
802.3 *	Ethernet
802.4 ↓	Token bus (was briefly used in manufacturing plants)
802.5	Token ring (IBM's entry into the LAN world)
802.6 ↓	Dual queue dual bus (early metropolitan area network)
802.7 ↓	Technical advisory group on broadband technologies
802.8 ↑	Technical advisory group on fiber optic technologies
802.9 ↓	Isochronous LANs (for real-time applications)
802.10 ↓	Virtual LANs and security
802.11 *	Wireless LANs
802.12 ↓	Demand priority (Hewlett-Packard's AnyLAN)
802.13	Unlucky number: Nobody wanted it
802.14 ↓	Cable modems (defunct: an industry consortium got there first)
802.15 *	Personal area networks (Bluetooth)
802.16 *	Broadband wireless
802.17	Resilient packet ring

Subcamada de Enlace Lógico

- Oculta as diferenças entre os tipos de redes 802
- Fornece um formato único e uma única interface para a camada de rede
- Baseada no HDLC (*High-level Data Link Control*)
- Três tipos de serviços
 - Datagrama não confiável
 - Sem controle de fluxo e de erros
 - Datagrama com confirmação
 - Sem controle de fluxo e com controle de erros
 - Confiável orientado a conexões
 - Com controle de fluxo e de erros

Subcamada de Enlace Lógico

- Formato do quadro
 - Ponto de acesso de destino (1 byte)
 - Identificará o tipo de dado do protocolo da camada acima
 - Ponto de acesso de origem (1 byte)
 - Controle (1 ou 2 bytes)
 - Número de sequência
 - Número de confirmação

SSAP (*Source Service Access Point*) ou DSAP (*Destination Service Access Point*) são nomenclaturas herdadas da terminologia OSI que servem para identificar os protocolos de camada superior que estão usando serviço

Material Utilizado

- Notas de aula do Prof. Igor Monteiro Moraes, disponíveis em <http://www2.ic.uff.br/~igor/cursos/redespg>

Leitura Recomendada

- Capítulo 4 do Livro "*Computer Networks*", Andrew S. Tanenbaum e David J. Wetherall, 5a. Edição, Editora Pearson, 2011
- Capítulo 5 do Livro "*Computer Networking: A Top Down Approach*", 5a. Ed., Jim Kurose and Keith Ross, Editora Pearson, 2010