

Camada de Enlace de Dados

Redes de Computadores

Profa. Kalinka Regina Lucas Jaquie Castelo Branco

Universidade de São Paulo

Março de 2020

Camada de Enlace de Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de serviços

Delimitação de quadros

Controle de erros

Controle de fluxo

- 1 Introdução
- 2 Tipos de serviços
- 3 Delimitação de quadros
- 4 Controle de erros
- 5 Controle de fluxo

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

- Arquitetura IEEE 802 é resultado da tentativa de estabelecer uma arquitetura padrão, nos moldes do RM-OSI/ISO, orientada para redes locais.
- Define somente padrões para os equivalentes níveis físico e de enlace do RM-OSI.

- IEEE 802:
 - Conjunto de normas para LANs e MANs;
 - Padrão adotado pelas seguintes organizações: ANSI, NIST e ISO
 - é dividido em partes que são publicados como livros separadamente
- IEEE 802.1
 - Apresenta uma introdução ao conjunto de padrões e primitivas de interface

- IEEE 802.2: Logical Link Control
 - Descreve a parte superior da camada de interface e primitivas de interface.
- Três padrões importantes para redes locais:
 - IEEE 802.3: CSMA/CD
 - IEEE 802.4: Rede em barramento
 - IEEE 802.5: Rede em anel

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

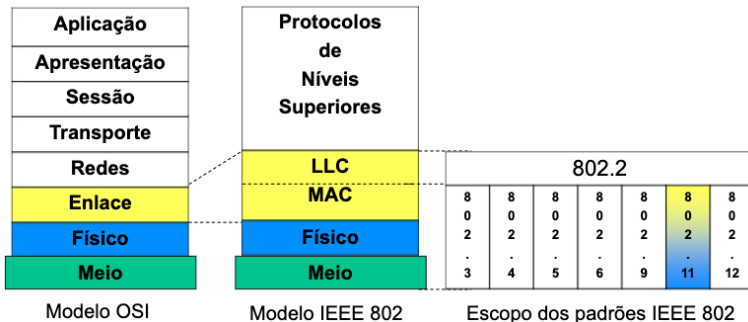
Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo



- A **Camada Física** executa um papel-chave na comunicação entre computadores, mas os seus esforços, sozinhos, não são suficientes. Cada uma de suas funções tem suas limitações. A **Camada de Enlace** trata dessas limitações.

| Camada 1 | Camada 2 |
|--|---|
| não pode se comunicar com as camadas de nível superior | Logical Link Control (LLC) |
| não pode nomear ou identificar computadores | usa um processo de endereçamento |
| descreve apenas os fluxos de bits | usa o enquadramento para organizar ou agrupar os bits |
| não pode decidir que computador irá transmitir os dados binários de um grupo onde todos tentam transmitir ao mesmo tempo | Media Access Control (MAC) |

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

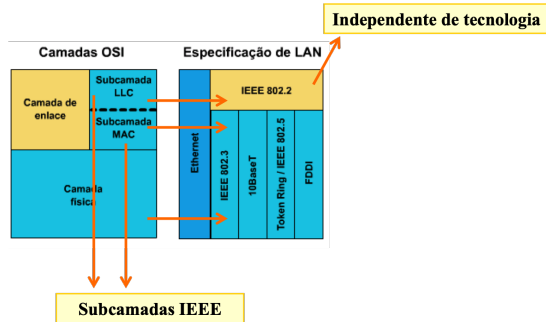
Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo



- Os padrões IEEE são os padrões LAN predominantes e mais conhecidos. Eles envolvem apenas as camadas mais inferiores: física e enlace.
- O IEEE 802.3 especifica a camada física e a parte do acesso por canal da camada de enlace (padrão Ethernet oficial).

- O **padrão IEEE** parece, à primeira vista, violar o modelo OSI.
- O **modelo OSI** é uma orientação geral amplamente aceita; o **IEEE** surgiu posteriormente para resolver os problemas surgidos após as redes terem sido criadas.
- **Padrão IEEE** : subcamadas LLC e MAC.
- **O padrão LLC do IEEE é independente do padrão LAN Ethernet 802.3, e não mudará** – não importa qual sistema de LAN seja utilizado. Os campos de controle do LLC servem para uso em todos os sistemas de LAN, e não apenas Ethernet, motivo pelo qual a subcamada LLC formalmente não faz parte das especificações do sistema IEEE 802.3.
- Todas as camadas abaixo da subcamada LLC são específicas da tecnologia de LAN individual em questão.

- **O IEEE criou a subcamada de enlace lógica** para permitir que a camada de enlace funcione independente das tecnologias existentes. A subcamada LLC da camada de enlace gerencia a comunicação entre os dispositivos em um único link de uma rede.
- **O LLC é definido na especificação IEEE 802.2** e suporta tanto serviços sem conexão quanto serviços orientados por conexão, usados por protocolos de camadas superiores.
- **A subcamada Media Access Control (MAC)** trata dos protocolos que um host segue para acessar os meios físicos

- Logical Link Control
 - Padrões 802.3,4,5,6 não oferecem uma comunicação confiável.
 - Para alguns protocolos (e.g., IP) este tipo de serviço é suficiente.

Camada de Enlace de Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

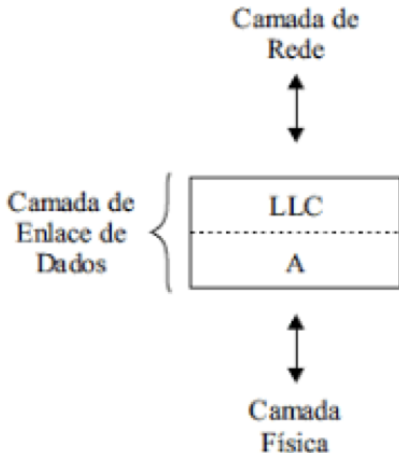
Tipos de serviços

Delimitação de quadros

Controle de erros

Controle de fluxo

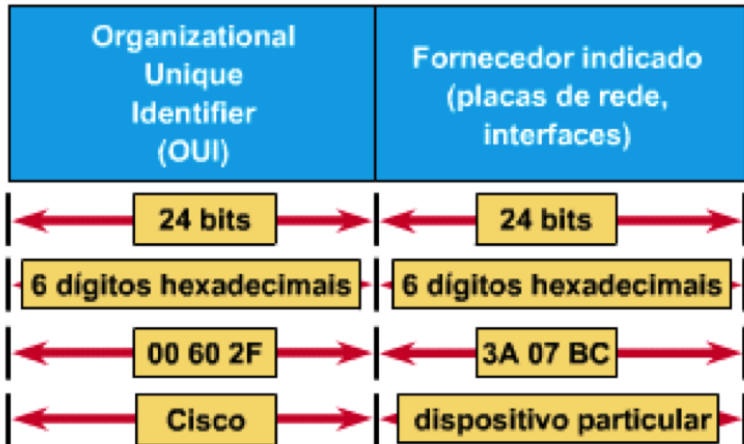
- Padrão IEEE 802.2
 - Provê um serviço de enlace com controle de erro e controle de fluxo.
 - Esconde as diferenças entre os diversos protocolos definidos pelos padrões 802.
 - Oferece um único formato e interface para a camada de rede.



- Provê três tipos de serviços:
 - Datagrama não confiável
 - Datagrama confirmado
 - Orientado a conexão confiável
 - Cabeçalho do LLC é baseado no HDLC
 - Diferentes formatos de quadros de dados e controle são usados dependendo do tipo de serviço usado

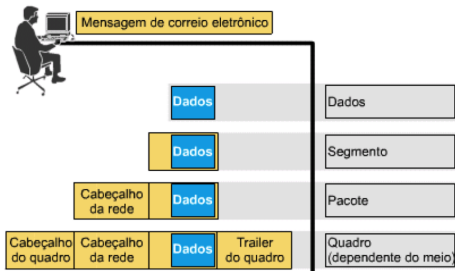
- Resumindo
 - se comunica com as camadas de nível superior através do Logical Link Control (LLC).
 - usa uma convenção de endereçamento simples.
 - usa o enquadramento para organizar ou agrupar os dados.
 - usa o Media Access Control (MAC) para escolher que computador transmitirá os dados binários, em um grupo onde todos os computadores estejam tentando transmitir ao mesmo tempo.

- Os endereços MAC (ou físico) têm 48 bits de comprimento e são expressos com doze dígitos hexadecimais.
- Os primeiros seis dígitos hexadecimais, que são administrados pelo IEEE, identificam o fabricante.
- Os seis dígitos hexadecimais restantes é administrado pelo fornecedor específico.
- Os endereços MAC são algumas vezes chamados de burned-in addresses (BIAs) porque eles são gravados na memória de apenas leitura (ROM) e são copiados na memória de acesso aleatório (RAM) quando a placa de rede é inicializada.
- Use o comando `ipconfig -all` para ver o endereço MAC da placa do seu computador. Exemplo: 00-0B-DB-E0-5A-F5.



- Antes de sair da fábrica, o fabricante do hardware atribui um endereço físico a cada placa de rede. Esse endereço é programado em um chip na placa de rede. Como o endereço MAC está localizado na placa de rede, se a placa de rede fosse trocada em um computador, o endereço físico da estação mudaria para o novo endereço MAC.
- Em uma rede Ethernet, quando um dispositivo quer enviar dados para outro dispositivo, ele pode abrir um caminho de comunicação com o outro dispositivo usando o seu endereço MAC. Quando uma origem envia dados em uma rede, os dados carregam o endereço MAC do destino pretendido. Como esses dados trafegam pelos meios da rede, a placa de rede em cada dispositivo na rede verifica se o seu endereço MAC corresponde ao endereço de destino físico carregado pelo pacote de dados.

- Uma parte importante do encapsulamento e do desencapsulamento é a adição de endereços MAC de origem e de destino. As informações não podem ser enviadas ou entregues corretamente em uma rede sem esses endereços.
- Os endereços MAC têm uma desvantagem : não têm estrutura e são considerados espaços de endereço contínuos.



- O enquadramento ajuda a obter as informações essenciais que não poderiam, de outra forma, ser obtidas apenas com fluxos de bit codificados. Exemplos dessas informações são:
 - que computadores estão se comunicando entre si.
 - quando a comunicação entre computadores individuais começa e quando termina.
 - um registro dos erros que ocorreram durante a comunicação.
 - de quem é a vez de "falar" em uma "conversa" entre computadores.

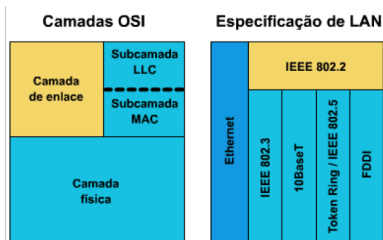
| Tamanho dos campos, em bytes | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| A | B | C | D | E | F |
| Campo Iniciar quadro | Campo Endereço | Campo Tipo/ Tamanho | Campo Dados | Campo FCS | Campo Parar quadro |

- O Media Access Control (MAC) refere-se a protocolos que determinam que computador em um ambiente de meios compartilhados (domínio de colisão) tem permissão para transmitir dados.
- Há duas grandes categorias de Media Access Control: determinística (revezamento) e não determinística (primeiro a chegar, primeiro a ser servido).
- Exemplo de protocolo determinístico: token ring.
- Exemplo de protocolo não determinístico: Aloha
CSMA/CD (Detecção de Portadora Para Múltiplo Acesso com Detecção de Colisão).

- O nome Ethernet descreve um recurso essencial do sistema: o meio físico, da mesma forma que o antigo conceito de que “espaço luminoso” (ether) propagava ondas eletromagnéticas pelo espaço.
- O Palo Alto Research Center (PARC), da Xerox Corporation, desenvolveu o primeiro sistema Ethernet experimental no início dos anos 70. Isso foi usado como base para a especificação 802.3 do IEEE, lançada em 1980. Logo após a especificação 802.3 de 1980 da IEEE, a Digital Equipment Corporation, a Intel Corporation e a Xerox Corporation desenvolveram conjuntamente e lançaram uma especificação Ethernet, versão 2.0, que foi substancialmente compatível com a IEEE 802.3. Juntas, a Ethernet e a IEEE 802.3 detêm atualmente a maior fatia de mercado de todos os protocolos LAN.

- Hoje, o termo Ethernet é freqüentemente usado para se referir a todas as LANs baseadas em CSMA/CD (Carrier sense multiple access/colli-sion detect) que normalmente estão em conformidade com as especificações Ethernet, incluindo a especificação IEEE 802.3.

- são LANs baseadas em CSMA/CD.
- são redes de broadcast.
- são implementadas através de hardware.
- A Ethernet fornece serviços correspondentes às camadas 1 e 2, enquanto a IEEE 802.3 especifica a camada física, a camada 1, e a parte de acesso a canais da camada de enlace, a camada 2, mas não define um protocolo de controle de enlace lógico.



Formatos de quadro Ethernet e IEEE 802.3

| ? | 1 | 6 | 6 | 2 | 46-1500 | 4 |
|-----------|---------------------------------|---------------------|--------------------|------|---------|------------------------------------|
| Preâmbulo | Início do delimitador de quadro | Endereço de destino | Endereço da origem | Tipo | Dados | Sequência de verificação do quadro |

especifica o protocolo da camada superior

indica o número de bytes de dados que vêm depois desse campo

| ? | 1 | 6 | 6 | 2 | 46-1500 | 4 |
|-----------|---------------------------------|---------------------|--------------------|-------------|-------------------------|------------------------------------|
| Preâmbulo | Início do delimitador de quadro | Endereço de destino | Endereço da origem | Comprimento | Cabeçalho e dados 802.2 | Sequência de verificação do quadro |

Os cabeçalhos das duas versões possuem o mesmo tamanho

Camada de Enlace de Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

- Padrão 802.1: introduz o conjunto de padrões e define as primitivas de interface.
- Padrão 802.2: descreve a parte superior da camada de enlace, que usa o protocolo LLC (Logical Link Control).
- Os padrões 802.3 até 802.5 definem padrões para LANs.

Camada de Enlace de Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

- Controla erros e fluxo a nível de enlace.
- Fornece uma interface comum que esconde as diferenças entre as diferentes redes 802:
 - 802.3 - Ethernet
 - 802.4 - Token Bus
 - 802.5 - Token Ring
 - 802.6 - Distributed Queue Dual Bus - DQDB

Camada de Enlace de Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

- Permite que mais de um protocolo seja usado acima dela (nível de rede).
- Adiciona ao dado recebido, informações de quem o enviou (protocolo), para que no receptor, a camada LLC, consiga entregar ao seu protocolo de destino.

Camada de Enlace de Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

- Define o uso de um endereço MAC em cada placa de rede (hardware).
- Endereço único, representado por números em hexadecimal.
- No quadro enviado a rede, a MAC, inclui o endereço de origem e destino.
- Outra função é controlar o uso do cabo.
- Utiliza um driver para acessar a camada física (driver da placa).

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

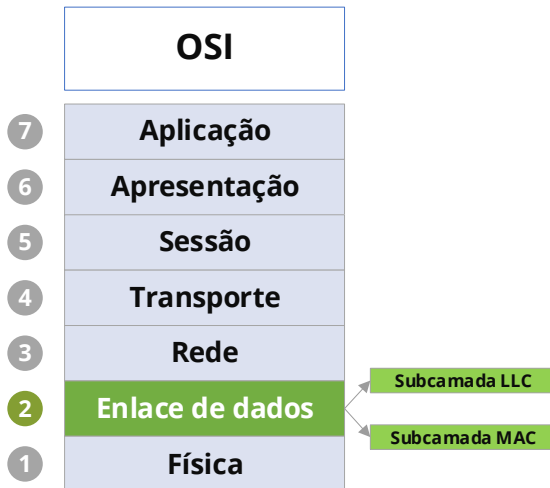
Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

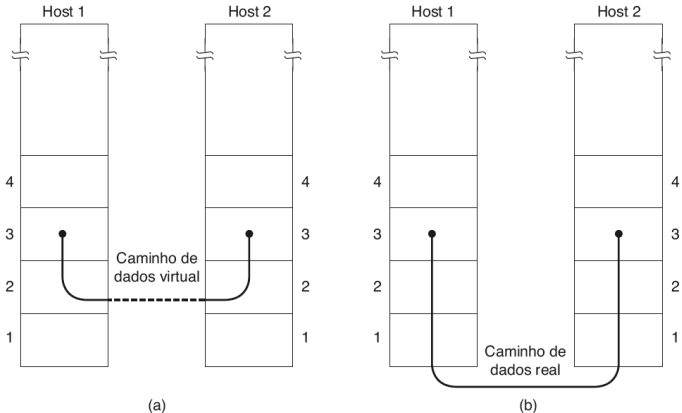
Controle de
erros

Controle de
fluxo



Função da Camada de Enlace de Dados

- Transferir dados da camada de rede da máquina de **origem** para a camada de rede da máquina **destino**.



Camada de Enlace de Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de serviços

Delimitação de quadros

Controle de erros

Controle de fluxo

- Lida com quadros (grupo de bits transmitidos pela rede);
- Depende da camada Física para enviar e receber os bits;
- Assegura que os quadros enviados pela rede serão recebidos com o devido tratamento de erros eventuais, que podem implicar em retransmissão do quadro.

- A camada de enlace de dados possui duas subcamadas: LLC e MAC.

Controle de Enlace Lógico (*Logical Link Control* – LLC)

Fornece mecanismos de multiplexação e controle de fluxo.

Controle de Acesso ao Meio (*Media Access Control* – MAC)

Provê acesso a um canal de comunicação e o endereçamento neste canal.

Definindo o contexto

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

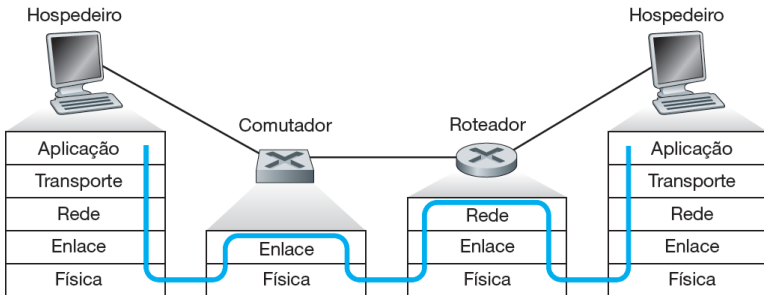
Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

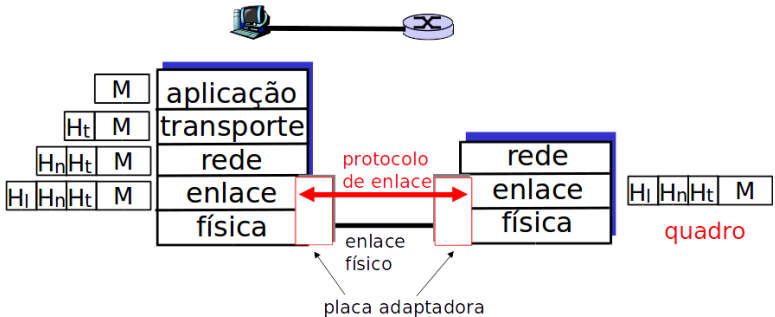


Definindo o contexto

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

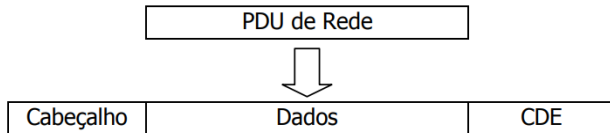
- Dois elementos físicos **fisicamente conectados**:
 - Host*-roteador, roteador-roteador, *host*-*host*.
- Unidade de dados: quadro (*frame*).



- Delimitação de quadros (enquadramento ou *framing*):
 - Divide e encapsula pacotes em quadros;
 - Acrescenta “endereços físicos” usados nos cabeçalhos dos quadros para identificar a fonte e o destino dos quadros.
- Acesso ao enlace:
 - Implementa acesso ao canal se o meio é compartilhado.
- Entrega confiável entre dois equipamentos fisicamente conectados:
 - Raramente usado em enlaces com baixa taxa de erro (fibra, alguns tipos de par trançado);
 - Enlaces sem fio (*wireless*): altas taxas de erro.

- 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 bit com erro(s) sem recorrer à retransmissão.

- A maioria dos protocolos de enlace possui os seguintes elementos:
 - **Cabeçalho:** possui informações de controle para que haja a comunicação horizontal entre as camadas de enlace da origem e do destino. O cabeçalho é formado por diversos campos, cada um com uma função específica no protocolo;
 - **Dados:** encapsula o PDU de rede passando pela camada de rede;
 - **Código de detecção de erro (CDE):** tem a função de controlar erros na camada de enlace.



Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

- Os serviços são fornecidos nas seguintes combinações:
 - Serviço sem conexão não confirmado;
 - Serviço sem conexão confirmado;
 - Serviço orientado a conexão confirmado.

- Conexão não é previamente estabelecida;
- A máquina emissora envia *frames* sem receber confirmação de recebimento da máquina receptora;
- Quadros perdidos são ignorados e tratados pelas camadas superiores;
- Adequado para:
 - Aplicações onde a taxa de erro é muito baixa;
 - Aplicações de tempo real onde dados atrasados são piores que dados ruins, como o *streaming* de áudio.
- Serviço normalmente usado em LANs.

- Conexão não é estabelecida previamente;
- Cada *frame* enviado é individualmente confirmado. Dessa forma o emissor sabe se o *frame* foi recebido ou não e poderá enviá-lo novamente;
- Origem usa um mecanismo de temporização para reenviar quadros não confirmados;
- Útil para canais não confiáveis, como *Wireless*.

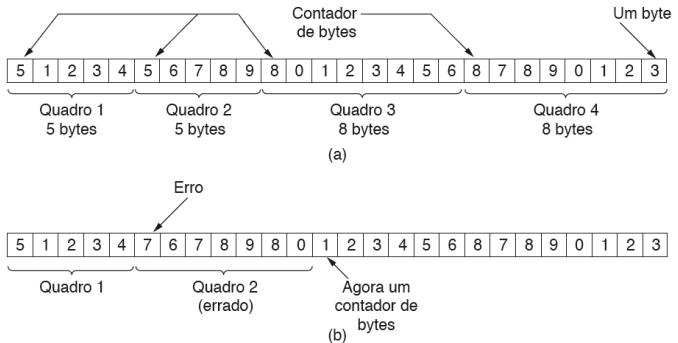
- Serviço mais sofisticado;
- Emissor e receptor estabelecem conexão antes do envio dos dados;
- Cada *frame* enviado é numerado.
- Cada *frame* é recebido exatamente uma vez e todos os *frames* chegam em ordem;
- O serviço oferecido para a camada de rede é uma sequência de bits corretos.

- Confirmação na camada de enlace é uma otimização e não um requisito:
 - Pode ser deixada para a camada de transporte (camada fim-a-fim).
- O serviço a ser oferecido para a camada de rede depende, dentre outros fatores, da aplicação que utilizará esse serviço.

- A camada física transmite uma sequência de bits (*bit stream*), que pode ser grande e conter erros;
- A camada de enlace deve detectar e, se necessário, corrigir os erros de transmissão;
- Inicialmente a sequência de bits é quebrada em *frames*.

- Os principais métodos para delimitação de quadros são:
 - Contagem de caracteres;
 - Caracteres de início e de fim, com caractere de preenchimento;
 - *Flags* de início e de fim, com caractere de preenchimento; e
 - Violação de código da camada física.

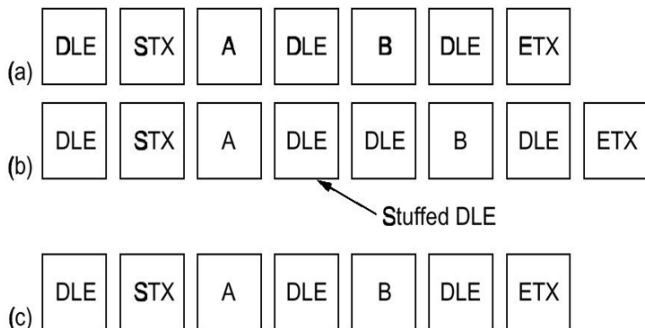
- Usa um campo no cabeçalho para indicar o número de caracteres no quadro;
- Problema: o caractere de contagem pode sofrer erro de transmissão, impossibilitando o reconhecimento do início do próximo quadro;
- Não é usado na prática para protocolos da camada de enlace.



Fluxo de bytes, (a) sem erro, (b) com erro.

- Reconhecimento do início e do fim de um quadro através dos caracteres ASCII:
 - Início: DLE STX (*Data Link Scape, Start TeXt*);
 - De fim: DLE ETX (*Data Link Scape, End of TeXt*);
 - Método usado em protocolos orientados a caracteres.

- E se os caracteres para DLE STX e DLE ETX ocorrem nos dados?
- Inserir um caracter DLE adicional antes de cada DLE nos dados (*byte stuffing*);
- Técnica presa ao código ASCII e a caracteres de 8 bits.
(Caracteres de tamanho arbitrário?)



(a) Dado enviado pela camada de rede.

(b) Dado após a inserção do DLE pela camada de enlace.

(c) Dado repassado para a camada de rede no receptor.

- Permite codificar caracteres com um número arbitrário de bits por caractere;
- Usa padrão especial de bits (*flag*) para sinalizar início e fim do quadro;
- Sempre que 5 “ums” (1s) consecutivos são encontrados nos dados, o emissor insere um zero (*bit stuffing*);
- Quando o receptor encontra cinco “ums” seguidos por um zero, o *stuff* é retirado;

Quadro Original

| | | |
|----------|---------------|----------|
| 01111110 | 0111111010110 | 01111110 |
|----------|---------------|----------|

Quadro Transmitido

| | | |
|----------|-------------------------|----------|
| 01111110 | 011111 0 1010110 | 01111110 |
|----------|-------------------------|----------|

Quadro Recebido

| | | |
|----------|-------------------------|----------|
| 01111110 | 011111 0 1010110 | 01111110 |
|----------|-------------------------|----------|

Quadro Original

| | | |
|----------|---------------|----------|
| 01111110 | 0111111010110 | 01111110 |
|----------|---------------|----------|

- Método baseado em uma característica da camada inferior;
- Existem códigos de transmissão que possuem uma transição no meio do período de transmissão de um bit (Manchester);
- O início e fim de quadro são determinados por um código de transmissão inválido;
- Algumas LANs codificam um bit de dados usando dois bits físicos:
 - Um bit 1 é codificado como um par alto-baixo;
 - Um bit 0 é codificado como um par baixo-alto;
 - Os pares alto-alto e baixo-baixo não são utilizados na codificação, então podem ser usados para a delimitação de quadros.
- Usado no padrão IEEE 802.

- Baseado em características da camada física (por isso violação);
- O início e fim do quadro é definido pela utilização de um código de transmissão inválido;
- Exemplo: na codificação 4B/5B, 16 das 32 possibilidades de sinal não são utilizadas, pode-se utilizar um destes códigos para sinalizar o início e o fim dos quadros;
- Por serem sinais reservados, não é necessário inserir bytes ou dits de dados;
- São fáceis de serem identificados.

Exercício

A codificação de caracteres a seguir é usada em um protocolo de enlace de dados:

- A: 01000111;
- B: 11100011;
- FLAG: 01111110;
- DLE: 00010000;
- STX: 00000010;
- ETX: 00000011.

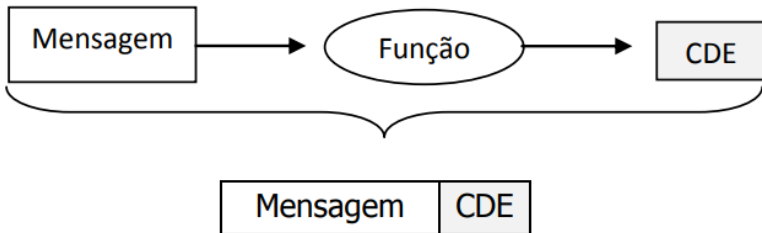
Mostre a sequência de bits transmitida (em binário) para o quadro de quatro caracteres: A B DLE FLAG quando é utilizado cada um dos métodos de enquadramento a seguir:

- (a) Contagem de caracteres.
- (b) Caracteres de início e de fim.
- (c) *Flags* de início e de fim.

- Como ter certeza que todos os quadros transmitidos foram entregues à camada de rede do destino, e na ordem correta?
- Qualquer transmissão está sujeita a problemas, como ruídos e atenuação;
- A camada de enlace de dados tem a função de realizar o tratamento dos possíveis erros;
- O controle de erro envolve duas etapas:
 - Detecção dos possíveis erros nos dados transmitidos;
 - Correção dos erros encontrados.

- O mecanismo de detecção de erro é semelhante ao esquema do dígito verificador largamente utilizado em códigos de barra, no CPF, etc.;
- O dígito verificador é gerado a partir dos números que compõem os números antecessores, utilizando-se de uma função previamente definida;

- Antes de enviar uma mensagem o transmissor utiliza uma função para gerar um código de detecção de erro (CDE) a partir da mensagem a ser enviada, de forma a gerar uma espécie de dígito verificador. Esse código é adicionado ao quadro que será enviado.



Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

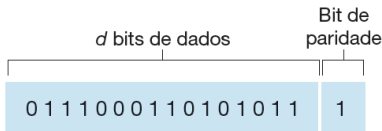
Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

- Bit de paridade;
- Checksum;
- Redundância Cíclica (CRC).

- Na **paridade simples**, insere-se 1 bit extra ao final de cada caractere de modo a deixar todos os caracteres com um número **par** ou **ímpar** de bits 1;
- Exemplo para um número par:



- Se ocorrerem um número par de erros eles não serão detectados;
- Este esquema deve ser utilizado somente em transmissões de baixa velocidade ou que apresentam poucos erros;

- Paridade bidimensional: os bits são divididos em i linhas e j colunas e para cada linha e coluna é calculado um bit de paridade.
- Exemplo para um número par:

| 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 |

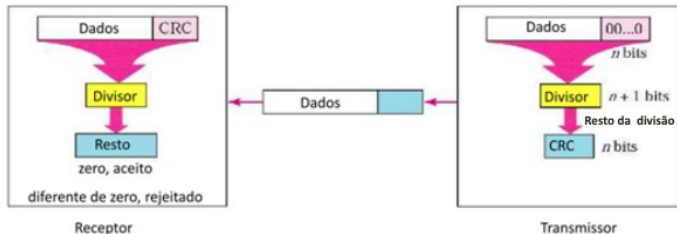
- Possível fazer correção no caso de um erro, mas não em dois erros em linhas ou colunas consecutivas.

- **Checksum:** é usado para indicar um grupo de bits de verificação, independentemente de como são calculados.
 - Um grupo de bits de paridade pode ser exemplo de *checksum*;
 - Porém, existem *checksums* mais robustos que os bits de paridade.
- Opera sobre palavras e não bits;
- Erros que passaram pelos bits de paridade podem ser encontrados;
- Exemplo: Protocolo IP - soma de verificação de 16 bits.

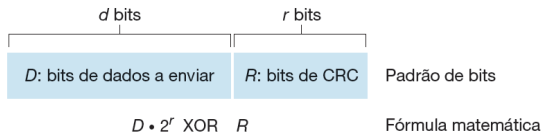
- Transmissor:
 - Divide a mensagem em k segmentos de n bits;
 - Soma os k segmentos;
 - Forma o *Checksum* com o complemento da soma;
 - Envia a mensagem junto como *checksum*;
 - Exemplo:
 - **1010100100111001**;
 - **10101001** — **00111001**;
 - $10101001 + 00111001 = \mathbf{11100010}$;
 - **00011101** (complemento da soma - *checksum*);
 - **1010100100111001 00011101** (mensagem codificada);

- Receptor:
 - Divide a mensagem em k segmentos de n bits;
 - Soma os k segmentos;
 - Forma o *Checksum* com o complemento da soma;
 - Se o *checksum* for igual a zero, dados aceitos!
 - Exemplo:
 - **1010100100111001 00011101** (mensagem recebida);
 - **10101001 — 00111001 — 0011101**;
 - $10101001 + 00111001 + 0011101 = 11111111$;
 - **00000000** (*checksum* é zero, mensagem aceita!);
 - **1010100100111001** (mensagem decodificada, o *checksum* enviado é descartado).

- *Cyclic Redundancy Check*, também conhecido como código polinomial;
- Técnica mais utilizada;
 - Serve para detectar erros num segmento transmitido.



- Emissor/receptor concordam com uma sequência de bits que representa o gerador G com $(r + 1)$ bits de comprimento e que tem o bit mais significativo (mais à esquerda) como 1;
- Ideia: sequência de bits a ser transmitida D com d bits com a soma de verificação deve ser divisível pelo gerador;
- Receptor tenta dividir pelo gerador. Se houver resto, houve um erro de transmissão.



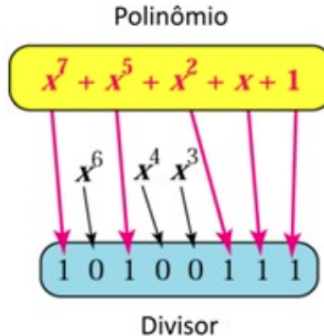
Curiosidade

O gerador usado no padrão IEEE 802 é a sequência
100000100110000010001110110110111.

- Para se calcular R, realiza-se o processo de divisão longa ao se subtrair o gerador caso o bit mais significativo em questão seja 1 ou, caso contrário, o seu múltiplo por 0.
- Na aritmética de módulo 2, tanto as adições quanto as subtrações são idênticas à operação XOR (OR exclusivo).

Verificação de redundância cíclica (CRC)

- Polinômio Gerador - nome dado para a representação polinomial do divisor:

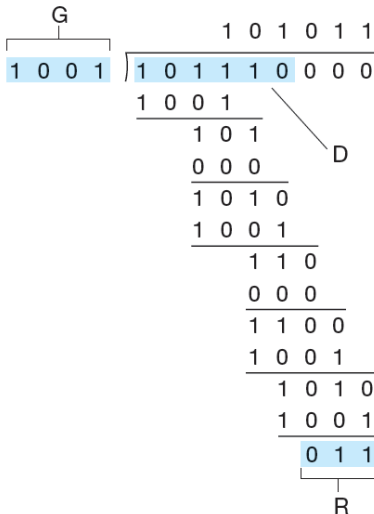


- Exemplos de polinômios e aplicações:

| Nome | Polinômio | Aplicação |
|--------|---|------------|
| CRC-8 | $X^8 + X^2 + X + 1$ | ATM header |
| CRC-10 | $X^{10} + X^9 + X^5 + X^4 + X^2 + 1$ | ATM AAL |
| CRC-16 | $X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$ | HDLC |
| CRC-32 | $X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$ | LANs |

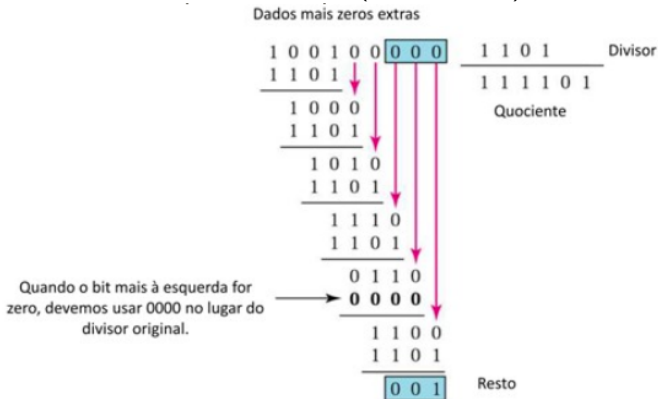
Verificação de redundância cíclica (CRC)

- Exemplo da obtenção do CRC:



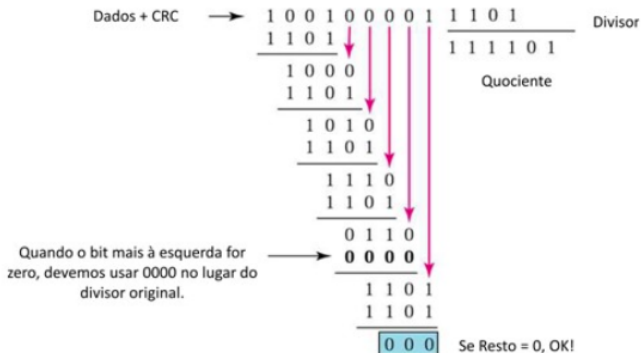
Verificação de redundância cíclica (CRC)

- Exemplo da obtenção do CRC (Transmissor):



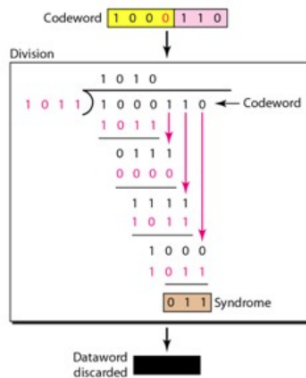
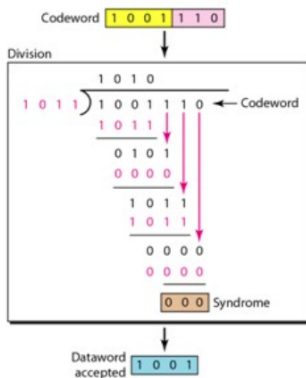
- Mensagem: 100100001 (Dados + CRC)

- Exemplo da obtenção do CRC (Receptor):



Verificação de redundância cíclica (CRC)

- Exemplo de Descarte:



- **Código de Hamming** é um código para a detecção (e correção) de erros em transmissões de dados binários;
- Basicamente o código de Hamming emprega o **bit stuffing** com paridade para assegurar que eventuais erros sejam detectados;
- É geralmente usado para comunicações em que a retransmissão é custosa e existe uma baixa taxa de erros.

- Os bits que são potências de 2 são bits de paridade e o restante são bits de dados:
 - Se os dados tiverem 1 bit, são usados 2 bits de paridade, totalizando 3 bits;
 - Se os dados tiverem 4 bits, são usados 3 bits de paridade, totalizando 7 bits;
 - Se os dados tiverem 7 bits, são usados 4 bits de paridade, totalizando 11 bits, e assim por diante;

| Posição do bit | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| bits codificados | p1 | p2 | d1 | p4 | d2 | d3 | d4 | p8 | d5 | d6 | d7 | d8 | d9 | d10 | d11 | p16 | d12 | d13 | d14 | d15 |

- Vários bits de paridade são acrescentados usando regras especiais;
- Com esta redundância é possível corrigir erros;
- Um quadro consiste de m bits de dados e r bits redundantes;
- O tamanho total n é dado por $m + r$;
- Esta unidade de n bits é chamada de **palavra de código - codeword**.

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

- Os bits são numerados;
- Bits que são potência de dois são de verificação (1,2,4,...);
- Os demais bits são dados (3,5,6,7,...);
- Cada bit de verificação força a paridade de um conjunto de bits (paridade par ou ímpar).

- Um bit pode ser incluído em vários cálculos de verificação;
- Para saber para quais bits de verificação o bit na posição (k) contribui, represente-o como uma soma das potências de 2, por exemplo:
 - **para $k = 11$: $11 = 1 + 2 + 8$;**
 - **para $k = 5$: $5 = 1 + 4$**

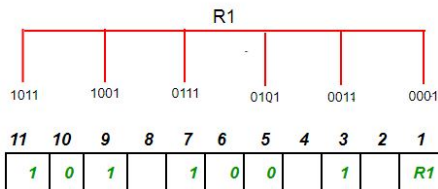
- Cada bit de dado é considerado em um conjunto de bits de paridade, de acordo com sua posição na forma binária:
 - O bit de paridade 1 cobre todas as posições cuja representação binária incluem 1 no bit menos significativo (1, 3, 5, 7, ...);
 - O bit de paridade 2 cobre todas as posições cuja representação binária incluem 1 no segundo bit menos significativo (2, 3, 6, 7, ...);
 - O bit de paridade 4 cobre todas as posições cuja representação binária incluem 1 no terceiro bit menos significativo (4–7, 12–15, 20–23, ...), e assim por diante;

| Posição do bit | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
|------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| bits codificados | p1 | p2 | d1 | p4 | d2 | d3 | d4 | p8 | d5 | d6 | d7 | d8 | d9 | d10 | d11 | p16 | d12 | d13 | d14 | d15 | |
| bits de paridade | p1 | X | | X | | X | | X | | X | | X | | X | | X | | X | | X | |
| | p2 | | X | X | | | X | X | | | X | X | | | X | X | | | X | X | ... |
| | p4 | | | | X | X | X | X | | | | | X | X | X | X | | | | | X |
| | p8 | | | | | | | | X | X | X | X | X | X | X | X | | | | | |
| | p16 | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | X | X | X |

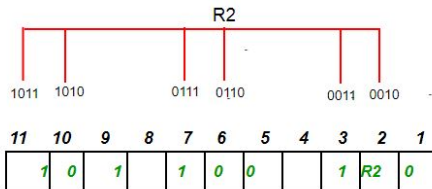
- Se quisermos enviar os bits 1011001, eles devem ser dispostos da seguinte maneira:

| 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|----|----|---|----|---|---|---|----|---|----|----|
| 1 | 0 | 1 | R8 | 1 | 0 | 0 | R4 | 1 | R2 | R1 |

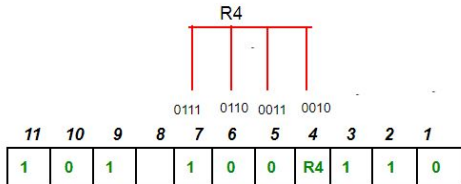
- Usando paridade par, o primeiro bit de paridade é 0.



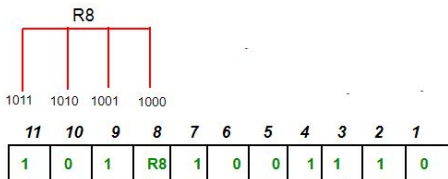
- Usando paridade par, o segundo bit de paridade é 1.



- Usando paridade par, o terceiro bit de paridade é 1.



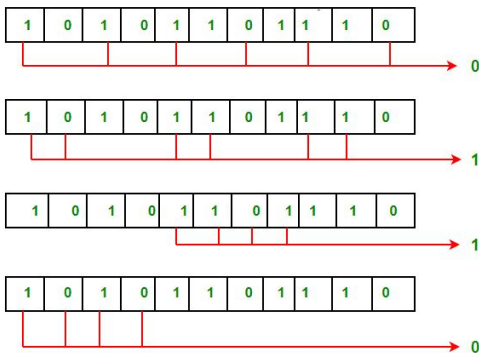
- Usando paridade par, o quarto bit de paridade é 0.



- A sequência a ser transmitida é 10101001110.

| 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |

- Se inserirmos um erro no sexto bit, a nova sequência se torna 10101101110.
- Aplicando-se o código de Hamming no receptor:



- É detectado o erro na posição 0110 ou na posição 2+4 (6) e o bit é invertido como correção.

Exercício

Um fluxo de bits 10011101 é transmitido com a utilização do método de CRC com gerador 1001. Qual é a sequência de bits real que é transmitida após a aplicação do método? Se o terceiro bit a partir da esquerda for invertido durante a transmissão, mostre como é feita a detecção pelo receptor.

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

Exercício

Um código de Hamming de 12 bits cujo valor hexadecimal é 0xE4F chega a um receptor. Qual era o valor original em hexadecimal? Suponha que não exista mais de 1 bit com erro.

- Emissor transmitindo mais rápido que o receptor pode aceitar. O que fazer?
- Algum mecanismo de *feedback* deve ser fornecido para que o emissor fique ciente das capacidades do receptor;
- Essa questão aparece também na Camada de Transporte;
- Existem vários esquemas, a maioria baseada em regras sobre quando o emissor pode enviar o próximo quadro.

Protocolo *Stop-and-Wait ARQ (Automatic Repeat reQuest)*

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo

- Pacotes são numerados com 1 bit já que só acontece um envio de cada vez.
- Caso não aconteça a confirmação do quadro, ele é retransmitido após esgotamento do *timer*.

Protocolo *Stop-and-Wait* ARQ

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

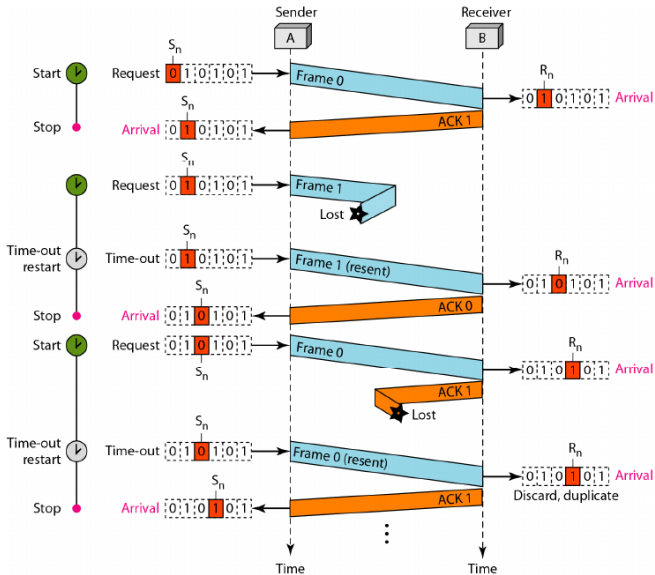
Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo



- São transmitidos um conjunto de quadros e confirma-se o último.
- Também chamado de protocolo de janela deslizante, pois utiliza janela de transmissão:
 - O transmissor mantém um conjunto de números de sequência correspondentes a quadros que ele pode enviar.

Protocolo Go-Back-N ARQ

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

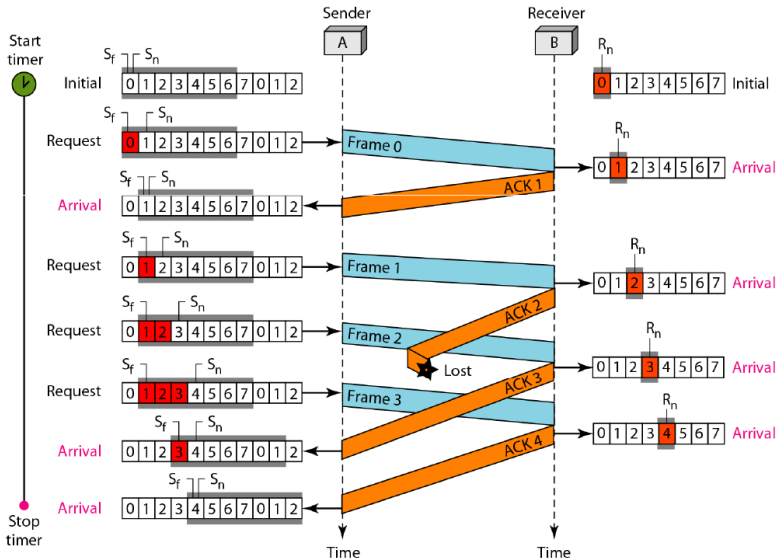
Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo



Camada de Enlace de Dados

Profa.
Kalinka
Branco

Introdução

Tipos de serviços

Delimitação de quadros

Controle de erros

Controle de fluxo

- Utiliza duas janelas: uma de transmissão e outra de recepção.
- Assim, quadros recebidos após um quadro que foi perdido não são descartados.

Protocolo *Selective-Repeat ARQ*

Camada de
Enlace de
Dados

Profa.
Kalinka
Branco

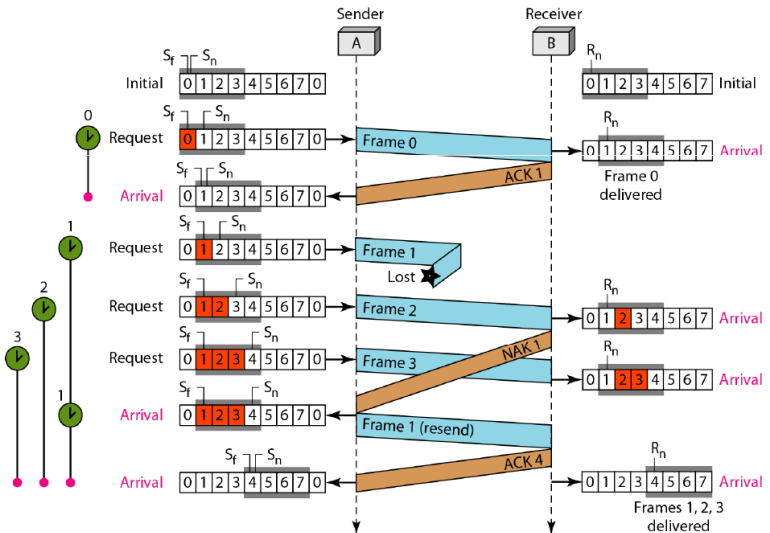
Introdução

Tipos de
serviços

Delimitação
de quadros

Controle de
erros

Controle de
fluxo



- Também conhecido como superposição;
- Consiste em adicionar o reconhecimento no campo ACK do cabeçalho do quadro que é normalmente enviado do receptor para o transmissor, pegando “carona” na volta.
- Melhor utilização da largura de banda, já que o campo ACK ocupa apenas alguns bits e há uma redução no número de quadros, reduzindo o tráfego na rede.