

Camada de enlace e física

Prof. Ronaldo Moreira Salles

Descrição

Importância do estudo das camadas física e de enlace relacionadas à infraestrutura física das redes, no contexto da arquitetura de redes de computadores. Principais problemas e soluções desenvolvidas.

Propósito

As camadas física e de enlace constituem partes fundamentais da infraestrutura física das redes. Estudar este tema permite compreender como os sistemas se conectam fisicamente e como a informação é propagada pelos enlaces da rede. Tais conhecimentos têm aplicação direta no projeto e na expansão e modernização das redes, bem como na solução dos mais diversos problemas que afetam essas estruturas.

Objetivos

Módulo 1

Camada física

Descrever a camada física da arquitetura de redes de computadores.

Módulo 2

Camada de enlace

Descrever a camada de enlace da arquitetura de redes de computadores.

Módulo 3

Subcamada de acesso

Descrever a subcamada de acesso ao meio.



Introdução

No processo de comunicação entre duas máquinas, temos diversas camadas envolvidas. Algumas camadas oferecem serviços através de softwares, como camada de aplicação, transporte e rede, que são as camadas mais altas, e temos as camadas mais baixas, enlace e física, que tem suas funções majoritariamente implementadas em hardware, na famosa placa de rede.

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



1 - Camada física

Ao final deste módulo, você será capaz de descrever a camada física da arquitetura de redes de computadores.

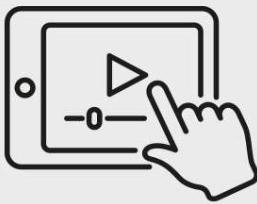
Introdução



A camada de enlace e física no modelo OSI

Antes de iniciar nosso estudo, vamos conhecer o modelo de referência Open System Interconnection e como as camadas de enlace e física estão inseridas nesse modelo.

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Agora que você entendeu que o modelo de referência OSI divide as funções das redes de computadores em sete camadas, vamos estudar as duas primeiras camadas.

A camada física

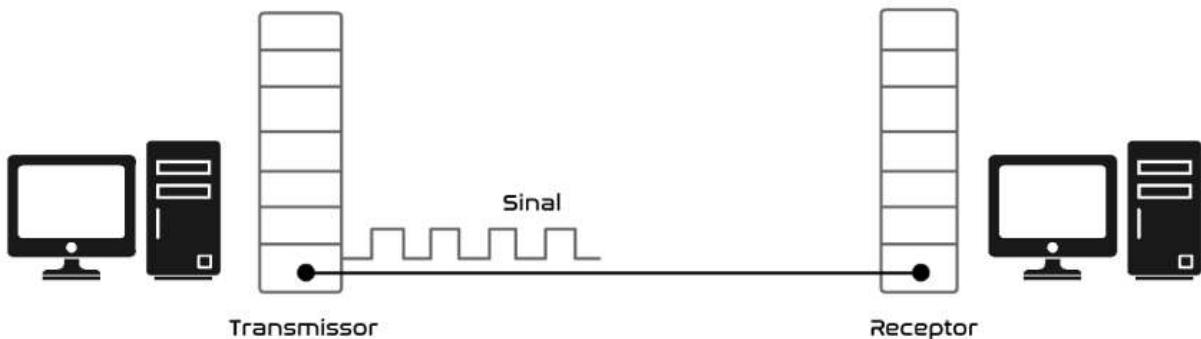
Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



A camada física é responsável pela geração e transmissão do sinal propriamente dito, que é levado de um transmissor ao receptor correspondente. Eles estão conectados por um [enlace físico de transmissão](#).

Enlace físico de transmissão

Exemplos de enlaces físicos: par trançado, cabo coaxial, fibra ótica, rádio frequência etc.



Geração e transmissão de sinal de um transmissor para um receptor.

Para ativar, manter e desativar o link físico entre sistemas finais, a camada física define especificações:



Elétricas



Mecânicas



Funcionais



Mecânicas

A partir disso, são determinadas características como:



Níveis de voltagem



Temporização de alterações de voltagem



Taxas de dados físicos



Distâncias máximas de transmissão



Conectores físicos



Outros atributos similares

Essa camada está completamente associada ao hardware dos equipamentos e enlaces.

Na camada física, a unidade de dados é o bit de informação. O bit é codificado em um sinal elétrico ou óptico, de forma a ser transmitido pelo transmissor do enlace até o receptor através do meio físico de transmissão.

O sinal sofre diversos efeitos ao ser enviado pelo meio de transmissão (como interferências, ruídos, atenuação) e chega ao receptor após ter experimentado todas essas alterações.

Ao chegar ao destino, o receptor precisa decodificar o sinal para receber o bit de informação. Dependendo da situação, o receptor pode ou não decodificar corretamente o bit enviado.

A imagem abaixo ilustra um diagrama em blocos simplificado do procedimento descrito anteriormente, em que o ruído e outros fatores podem dificultar a recepção do sinal e causar erros na interpretação dos bits.



Diagrama em blocos simplificado da transmissão do sinal em um canal de comunicação.

A seguir, abordaremos esses componentes e os conceitos principais com mais detalhes.

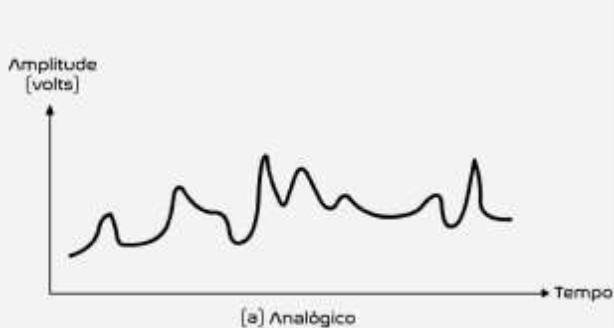
Transmitindo informações

Transmissão de sinais

Em redes de comunicação, a informação deve ser codificada em um sinal transmitido pelo canal do transmissor até o receptor.

Os sinais podem ser analógicos ou digitais.

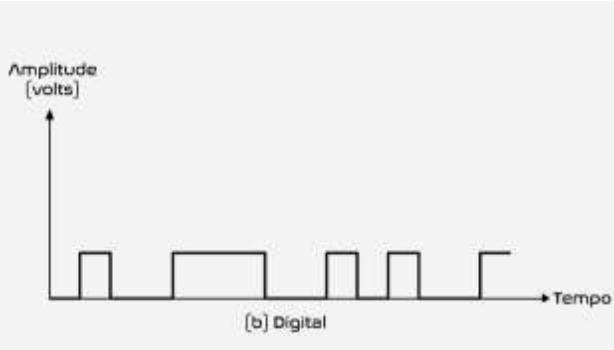
Você sabe qual é a diferença?



Sinais analógicos

Apresentam a intensidade (amplitude), variando suavemente com o tempo.

X



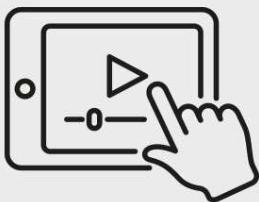
Sinais digitais

Mantêm um nível constante de intensidade e, depois, mudam abruptamente para outro nível constante de intensidade.



Diferenças entre sinais analógico e digital

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.

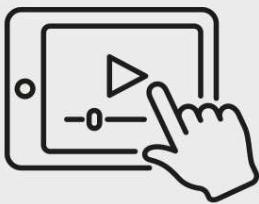


Sinal periódico



Sinal periódico e suas propriedades

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Sinal periódico é qualquer sinal (análogo ou digital) que se repete em um período de tempo T , conforme imagem abaixo:

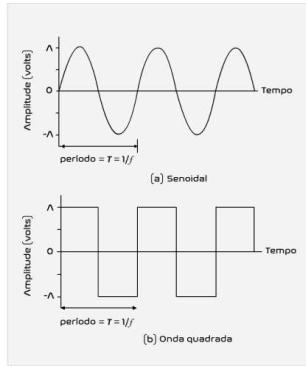


Gráfico: Sinal periódico.

Stallings, 2005.

A frequência do sinal é dada pelo valor inverso do período de repetição:

$$f = 1 / T$$

Rotacione a tela.

O Período (T) é expresso em segundos (s), e a frequência (f), em hertz (Hz).

Quanto mais rápida for a variação do sinal (menor período), maior será a frequência.

É importante guardar essa relação quando formos estudar outros conceitos mais avançados, como banda passante e taxa de transmissão de dados.

Além da frequência, o sinal apresenta ainda como propriedades:

Amplitude A

Ponto máximo de intensidade.

Fase Φ

Posição relativa do sinal dentro de um período de repetição.

É possível codificar a informação variando as grandezas do sinal (f, A, Φ); assim, o sinal pode transportar o dado de um ponto ao outro do enlace.

Os gráficos abaixo mostram os sinais variando em amplitude, frequência e fase.

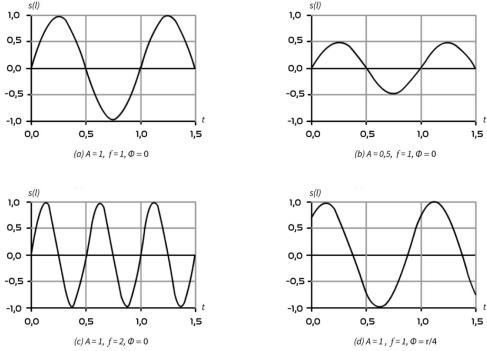


Gráfico: Variação do sinal em amplitude, frequência e fase.

Stallings, 2005.

Nas imagens dos sinais expostos anteriormente, apresentamos os sinais em função de suas variações ao longo do tempo, mas os sinais podem também ser representados no **domínio da frequência**.

Exemplo

A senoide, que vimos na imagem do sinal periódico, apresenta uma única **componente** no domínio da frequência, que é o próprio valor de f .

Pela análise de Fourier, é possível demonstrar que qualquer sinal pode ser decomposto em componentes (senoides) de frequência e intensidades diferentes.

No gráfico a seguir, o sinal resultante (à direita) pode ser obtido pela soma do primeiro sinal de frequência f e amplitude A com o segundo sinal de frequência $3f$ e amplitude $0,4A$.

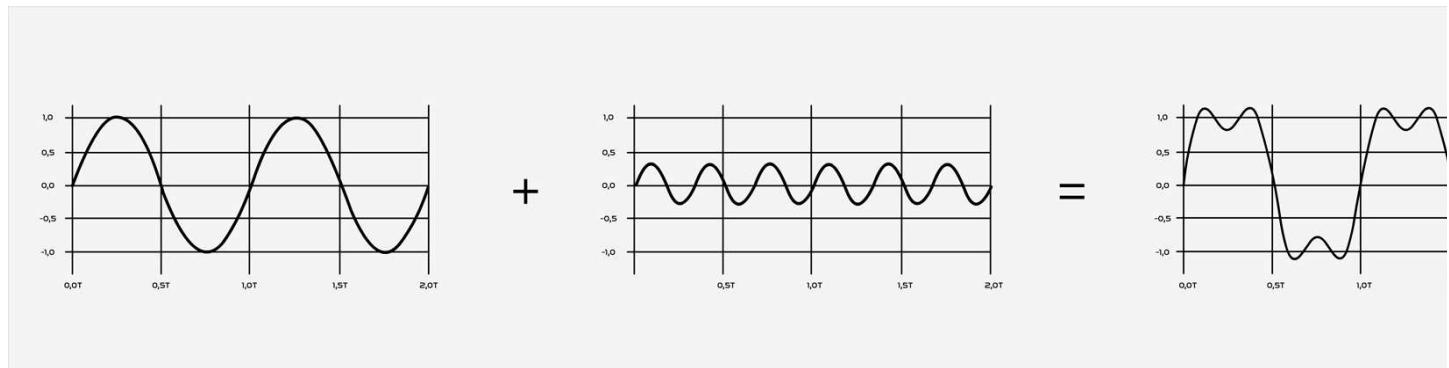


Gráfico: Decomposição de sinais em componentes de frequência.

Stallings, 2005.

Banda passante

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Agora, podemos entender o conceito de **banda passante** do canal de comunicações.

Trata-se do conjunto contíguo de frequências de sinal que, ao passarem pelo canal de comunicação, são praticamente inalteradas.

As componentes de frequência do sinal que estão além da banda passante sofrem forte atenuação e são eliminadas.

Podemos imaginar o canal de comunicação como um filtro que deixa passar as componentes dentro da faixa de frequências especificadas pela banda passante e bloqueia as demais componentes fora da banda passante.

Vamos ver um exemplo?

Digamos que o sinal resultante (à direita) da imagem acima será transmitido por um canal de largura de banda $2f$ Hz, que deixa passar sem atenuação componentes de frequência entre valores $0,5f$ e $2,5f$.

Ao transmitir esse sinal pelo canal, a componente de frequência $3f$ será completamente eliminada, e o sinal que aparecerá do outro lado será simplesmente a senoide de frequência f , conforme gráfico abaixo.



Gráfico: Exemplo teórico de um canal ideal filtrando a componente $3f$ do sinal TX.
Ronaldo Moreira Salles.

Um sinal digital apresenta variações abruptas na sua intensidade, o que pode ser representado no domínio da frequência por componentes de frequência muito elevados.

Assim, ao passar por um canal de comunicação, o sinal sofre distorções causadas pela banda passante do canal.

Quanto maior for a banda passante, menor será o efeito de filtragem do canal. Com isso, o receptor terá mais facilidade para interpretar a informação contida no sinal.

O gráfico abaixo ilustra a codificação de um caractere de informação (101111011) em uma possível representação por um sinal digital. Os desenhos que se seguem ilustram os efeitos de diferentes larguras de banda sobre a composição do sinal.

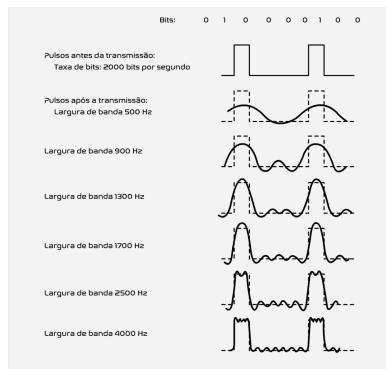


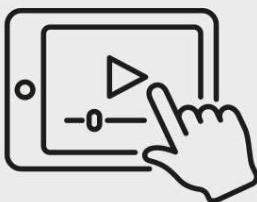
Gráfico: Efeitos da largura de banda sobre o sinal digital.

Stallings, 2005.

Taxa de transmissão

Outro conceito importante é a **taxa de transmissão** (*bit rate*) de um canal ou meio físico, que é dada pela quantidade de bits que esse meio consegue transmitir por segundo.

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Essa taxa pode ser expressa em:



Bits por segundo (bps)



Kilobits por segundo (Kbps)



Megabits por segundo (Mbps)



Gigabits por segundo (Gbps)

Pelos conceitos estudados, sabemos que:

QUANTO MAIOR A
TAXA DE TRANSMISSÃO



MAIOR DEVERÁ SER A
LARGURA DE BANDA DO CANAL
PARA SUPORTAR ESSA TAXA

O sinal recebido pelo receptor é diferente do sinal que foi transmitido, pois sofreu todos os efeitos introduzidos pelo canal de comunicação.

Esses efeitos degradam o sinal e podem gerar erros de bits, ou seja, erros de interpretação na decodificação do sinal pelo receptor, em razão das alterações sofridas.

Além das distorções causadas pela banda passante limitada dos meios físicos, o sinal pode sofrer também uma série de outras degradações, como:

Atenuação



A **atenuação** é a perda de potência do sinal devido à passagem pelo meio de transmissão (canal), fazendo com que a potência do sinal recebido pelo receptor seja menor do que a potência do sinal no momento em que foi transmitido. Caso a potência seja muito baixa na recepção (abaixo de determinado limiar), o sinal estará muito fraco e mais sujeito aos ruídos, podendo gerar erros no receptor.

O sinal transmitido em espaço livre (meio físico) sem obstáculos, onde o transmissor e o receptor são separados por uma distância d , sofre uma atenuação proporcional ao inverso do quadrado da

distância $1/d^2$.

Em outras palavras, a razão entre a potência do sinal recebido (P_r) e a potência do sinal transmitido (P_t) é proporcional ao inverso do quadrado da distância: $P_r/P_t \sim 1/d^2$ (RAPPAPORT, 2001). Para outros meios físicos e contextos de transmissão, as relações seguem outra formulação.

Ruído

Pode ser entendido de forma ampla como sinais indesejados que são inseridos pelo meio físico de transmissão ou causados por fontes externas, comprometendo a integridade do sinal.

Os ruídos são classificados em diversos tipos e podem ser provenientes de fontes distintas.

O tipo de ruído mais comum é o **ruído térmico (ou ruído branco)**, que afeta todos os sistemas, pois ocorre em função da agitação dos elétrons no meio físico em virtude da temperatura.

O ruído térmico não pode ser eliminado completamente, limitando a capacidade máxima de um sistema de comunicação. A imagem ilustra o efeito do ruído do canal sobre o sinal digital e os erros de interpretação de bits por parte do receptor.

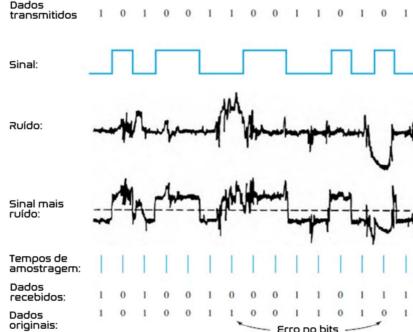


Gráfico: Efeito do ruído sobre o sinal e a decodificação dos bits.

Stallings, 2005.

Meios de transmissão

Meios físicos de transmissão

Os **meios físicos de transmissão** que compõem o canal de comunicação são classificados em:

Guiados

Sinal é confinado.



Não guiados

Transmissão em espaço aberto.

Vamos conhecer melhor cada um?

Meios de transmissão guiados

São geralmente empregados como meios físicos guiados, o cabo de par trançado, o cabo coaxial ou o cabo de fibra óptica:

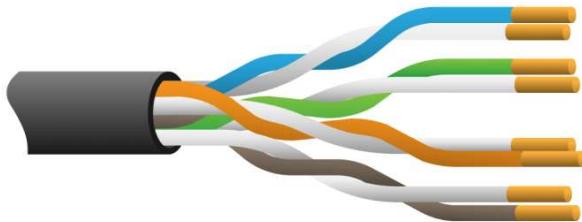
Par trançado

A imagem abaixo apresenta um diagrama esquemático do par trançado. Esse meio físico é composto por dois fios de cobre em espiral. O trançado facilita o manejo e reduz interferências. Cada par trançado pode representar um canal de comunicação isolado.



Diagrama do par trançado.

Assim como na imagem abaixo, mais de um par é normalmente agrupado em um cabo com capa protetora, sendo geralmente comercializado dessa forma.



O par trançado é um dos meios físicos mais comuns para telefonia e redes locais prediais. As categorias mais encontradas são: categoria 5, com banda passante de 100Mhz, e a categoria 7, com banda passante de 1Ghz.

Coaxial

O diagrama esquemático do cabo coaxial está representado na imagem abaixo. O cabo é composto de quatro elementos, de dentro para fora, o condutor interno que é um núcleo de cobre, isolador dielétrico interno, malha de cobre e revestimento plástico. Devido à sua própria confecção, ele é mais imune às interferências do que o par trançado, porém é menos flexível e usualmente mais caro. Alcança bandas passantes superiores a 500 MHz nos cabos de melhor qualidade, sendo muito empregado até os dias de hoje em redes de televisão a cabo.

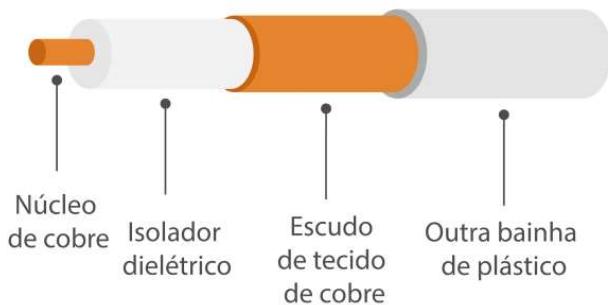


Diagrama do cabo coaxial.

Fibra óptica

A fibra óptica é o outro tipo de meio físico guiado bastante utilizado.

De forma diferente do par trançado e do cabo coaxial, na fibra óptica, os sinais são constituídos de pulsos de luz; sendo assim, a fibra óptica não sofre interferências eletromagnéticas.

A fibra óptica é constituída de um filamento flexível e transparente fabricado a partir de vidro ou plástico. Ela é composta de um material com maior índice de refração (núcleo) envolto por um material com menor

índice de refração (casca). Na imagem abaixo, o núcleo e o revestimento são caracterizados por diferentes índices de refração da luz $n_1 > n_2$.

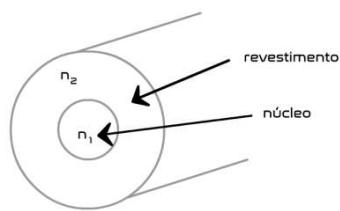
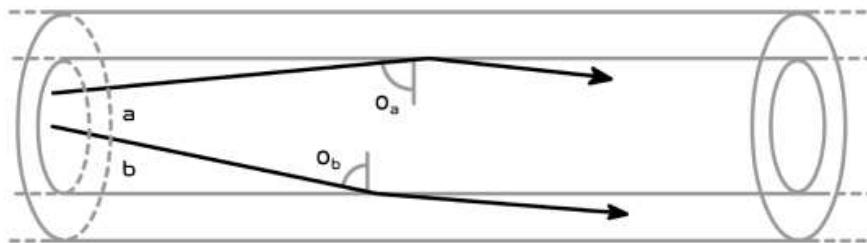


Imagen: Diagrama da fibra óptica.

Pela [Lei de Snell](#), também conhecida como lei da refração da luz, existe uma relação direta entre os índices e ângulos de incidência da luz, de forma que ela possa ser refletida e seguir se propagando pelo interior da fibra, vide feixe de luz "a" da imagem abaixo. Esse é o princípio de propagação dos sinais luminosos em uma fibra óptica.

Lei de Snell

Willebrord Snellius (1580 – 1626) foi um astrônomo e matemático holandês, mais conhecido pela lei da refração (Lei de Snell-Descartes).



Reflexão total do raio de luz "a" e refração do raio de luz "b".

O par trançado e o cabo coaxial transportam o sinal eletromagnético. Na fibra óptica, o sinal é propagado na forma de luz.

Par trançado

Vantagens: Mais flexível e barato.

Desvantagens: Enfrenta em maior escala o problema de interferências eletromagnéticas.

Cabo Coaxial

Vantagens: O sinal fica mais protegido de interferências quando comparado ao par trançado. Não precisa de nenhum componente eletro-óptico (caso da fibra óptica).

Desvantagens: Menos flexível e mais pesado que o par trançado. Menos capacidade de transmissão de informação que a fibra óptica.

Fibra óptica

Vantagens: Possibilita altas taxas de transmissão de dados (elevada banda passante), apresenta baixa atenuação com a distância, é imune a interferências eletromagnéticas e possui baixo peso.

Desvantagens: Pouca flexibilidade, custos mais elevados e conectorização mais difícil.

A fibra óptica é o meio físico principal que garante a interconexão global das redes de dados.

A imagem abaixo ilustra as conexões por cabos submarinos que empregam as fibras ópticas como meio de transmissão.

Embora as fibras ópticas sejam amplamente utilizadas em enlaces de longas distâncias, atualmente observa-se o emprego crescente desse material nas residências dos assinantes de serviços de internet.



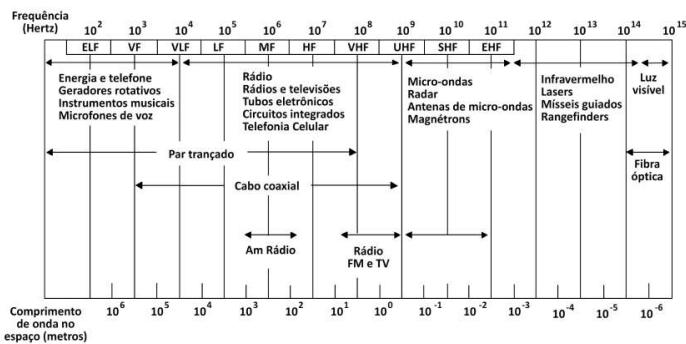
Conexões de cabos submarinos empregando fibra óptica como meio de transmissão.

Meios de transmissão não guiados (espaço aberto)

A transmissão de sinais em meios não guiados se refere à **transmissão em espaço aberto**.

Nesse ambiente, uma série de sinais e ondas eletromagnéticas estão presentes e compartilham o espaço em diferentes frequências.

É possível classificar as transmissões em meio não guiado (sem fio) de acordo com as frequências das ondas utilizadas. A imagem abaixo ilustra o espectro eletromagnético e a correspondente classificação.



Espectro eletromagnético.

De acordo com a imagem acima, é possível separar as transmissões em espaço aberto em três grandes grupos que apresentam características distintas: ondas de rádio (radiofrequência – RF), micro-ondas e infravermelho. Cada grupo pode ainda ser dividido em subgrupos.

Os sinais de radiofrequência se espalham desde as centenas de Khz até, no máximo, poucas unidades de Ghz. Estão incluídas nessa faixa as ondas de rádio AM e FM, a TV e a telefonia celular. As redes Wi-Fi operam na faixa conhecida como **ISM**, nas frequências de 900Mhz, 2.4Ghz e 5Ghz.

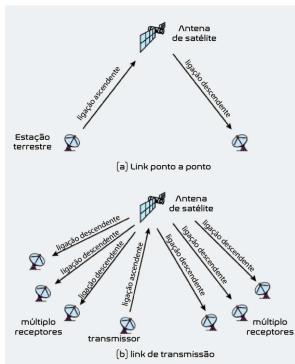
5M

ISM (Industrial Sientific and Medical) são faixas de frequência não licenciadas do espectro eletromagnético.

Nessas faixas de frequência, o sinal transmitido é irradiado em diversas direções, o que permite um bom suporte à mobilidade para as estações receptoras.

Na faixa das micro-ondas, os comprimentos de onda dos sinais são pequenos, e existe a necessidade de haver um alinhamento entre as antenas dos transmissores e receptores dos sinais (linha de visada). As frequências mais altas garantem elevadas bandas passantes para os canais de micro-ondas, porém esses canais são mais suscetíveis às interferências causadas pelas condições climáticas.

A próxima imagem ilustra a comunicação via satélite que opera na faixa de micro-ondas tanto em enlaces ponto a ponto quanto em enlaces do tipo *broadcast*.



Enlaces de micro-ondas via satélite.

O terceiro grupo emprega transmissões em frequências ainda mais elevadas na faixa do infravermelho e dos lasers. Nessa faixa, também é necessário o alinhamento entre transmissor e receptor. Geralmente, são empregados em enlaces de curto alcance, pois apresentam dificuldade para transpor obstáculos.

Falta pouco para atingir seus objetivos.

Vamos praticar alguns conceitos?

Questão 1

Assinale a alternativa correta:

- A O ruído branco só aparece em canais com elevada largura de banda.

- B

Quanto maior o período de um sinal periódico maior será a sua frequência.

- C Sinais digitais são imunes ao ruído.
- D O ruído branco está presente em qualquer canal de comunicação.
- E Sinais analógicos são mais adequados para transmitir dados digitais.

Parabéns! A alternativa D está correta.

O ruído branco (ruído térmico) está presente em todos os sistemas de comunicação, pois ocorre devido à agitação dos elétrons no meio físico em função da temperatura.

Questão 2

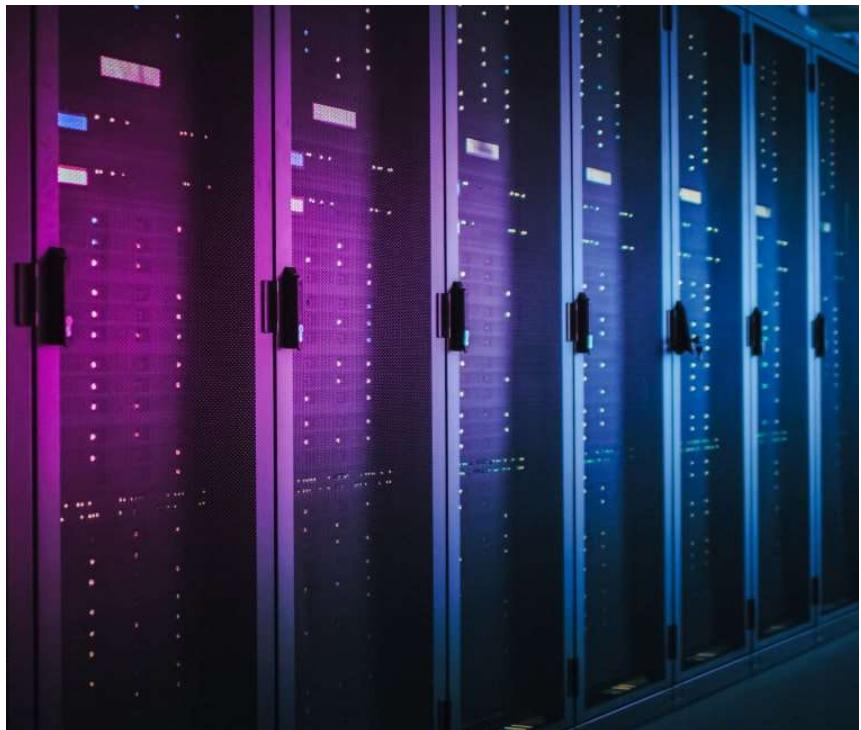
Os meios de transmissão podem ser classificados como guiados e não guiados e cada um tem características próprias que influenciam na transmissão dos sinais. Em relação aos meios de transmissão, selecione a opção correta:

- A A fibra óptica apresenta maior largura de banda que o par trançado.
- B O par trançado está menos sujeito à interferência eletromagnética do que a fibra óptica.
- C Os enlaces de micro-ondas operam em faixas de frequência inferiores aos enlaces rádio.
- D Em um enlace de micro-ondas não é necessário haver linha de visada.

- E Os cabos coaxiais são um exemplo de meio de transmissão não guiado.

Parabéns! A alternativa A está correta.

Os meios de transmissão guiados podem ser subdivididos em cabo coaxial, par trançado e fibra ótica. As fibras óticas são as que possuem maior largura de banda e estão sujeitas a menos interferências que os demais. Os meios de transmissão não guiados transmitem os dados no espaço aberto e, de acordo com a frequência utilizada, tem características próprias. As transmissões em frequências mais altas, chamadas de micro-ondas, transmitem os sinais em linha reta e as antenas precisam ter linha de visada. Diferente das transmissões rádio, que não precisam de linha de visada.



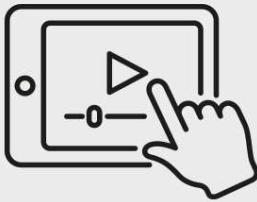
2 - Camada de enlace

Ao final deste módulo, você será capaz de descrever a camada de enlace da arquitetura de redes de computadores.

A camada de enlace

Serviços da camada de Enlace

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



A camada de enlace está situada imediatamente acima da camada física. Elas atuam juntas de forma direta.

Conforme estudado, apresentamos diversos fatores que podem afetar a transmissão do sinal no meio físico. Alguns desses fatores representam características do meio, não sendo possível eliminá-los (como o ruído térmico).

Os erros na recepção dos sinais são previstos e a camada física por si só não pode recuperá-los, cabendo à camada de enlace controlá-los.

Para que o serviço de transmissão de bits pelo meio físico seja confiável, a camada de enlace realiza as seguintes funções:



Delimitação de quadros



Controle de erros



Controle de fluxo



Controle de acesso ao meio

Observação importante é que o modelo OSI considera que todas as funções acima são desempenhadas pela camada de enlace, mas para facilitar o entendimento, iremos adotar a estrutura definida na arquitetura IEEE 802 que considera a camada de enlace dividida em duas subcamadas: LLC (Controle de Enlace Lógico) e MAC (Controle de Acesso ao Meio).

Estudaremos neste módulo a subcamada LLC responsável pelas três primeiras funções. Vamos lá?

Delimitação de quadros (enquadramento)

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Para o melhor desempenho de suas funções, a **camada de enlace utiliza o quadro como unidade de dados**.

O quadro é um conjunto de bytes de informação que pode variar de tamanho conforme o protocolo a ser utilizado.

Suponhamos que determinado transmissor tenha uma quantidade muito grande de dados para transmitir ao receptor. Ao final dessa transmissão, percebe-se que, em algum momento, houve um erro no sinal recebido por conta dos problemas do canal.

Dessa forma, o transmissor precisaria repetir toda a transmissão para garantir a informação correta ao receptor. No entanto, se dividíssemos essa grande quantidade de dados em conjuntos menores (quadros) e transmitíssemos quadro após quadro, havendo um erro na transmissão, seria possível identificar qual quadro foi afetado.

Com isso, só repetiríamos a transmissão desse quadro, tornando o controle de erros muito mais eficiente.

Entendendo a importância da utilização de quadros no nível de enlace, verificaremos como criar os quadros, ou seja, como partitionar os dados delimitando o início e o fim de cada quadro.

Existem basicamente quatro técnicas para realizar o enquadramento dos dados e, em alguns casos, as técnicas são combinadas. Vejamos!



Contagem de caractere



Enquadramento por caractere



Enquadramento por bit



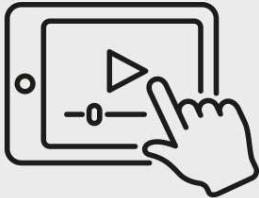
Violão de códigos do nível físico

Vamos conferir essas técnicas detalhadamente!



Enquadramento por caractere

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.

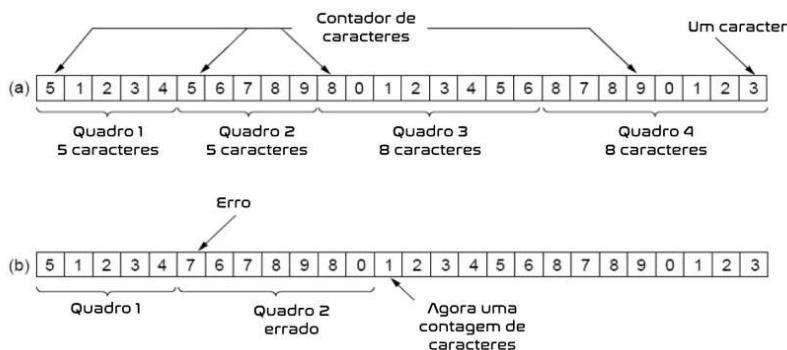


Na técnica de contagem de caractere, a ideia é **adicionar um campo no início do quadro, informando o número total de caracteres presentes**.

Ao receber o quadro, o receptor (RX) lê o campo de contagem e, a partir de então, consegue determinar onde está o final do quadro.

O problema dessa técnica simples é que, se houver um erro justamente nesse campo de contagem, o transmissor (TX) e o receptor (RX) terão interpretações diferentes sobre os quadros e perderão completamente o sincronismo.

Veja o exemplo a seguir:

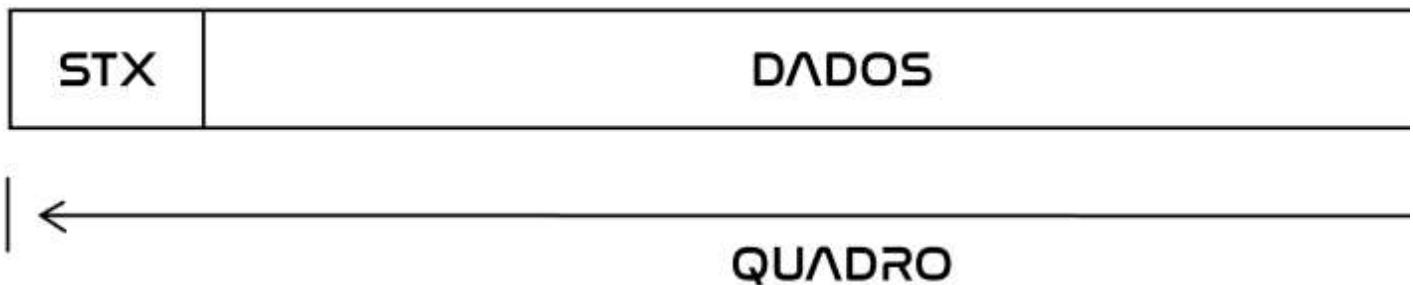


Problema de sincronização entre o TX e o RX quando há um erro no campo de contagem.

Devido ao problema, ilustrado na imagem acima, a técnica de contagem de caractere só é utilizada em conjunto com outras técnicas.

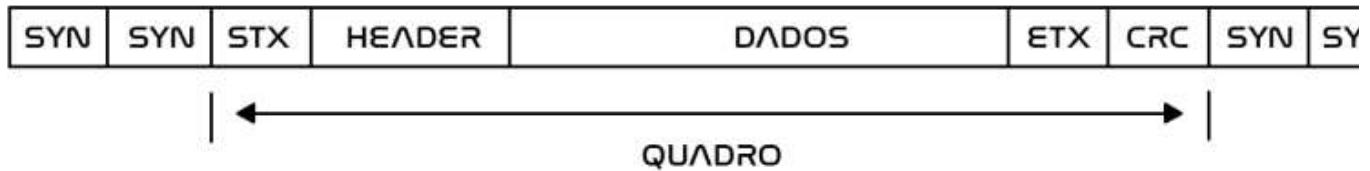
Enquadramento por caractere

Na técnica de enquadramento por caractere, a ideia é utilizar caracteres especiais para indicar o início (STX) e o fim do quadro (ETX). O transmissor insere essas marcas. Com isso, o receptor fica sabendo exatamente onde começa e termina cada quadro.



Enquadramento por caractere.

Além disso, outros campos são incluídos no quadro, como os campos de sincronização (SYN), cabeçalho (HEADER) e códigos para verificação de erros (CRC). A imagem abaixo ilustra o quadro com todos esses campos.



Enquadramento por caractere.

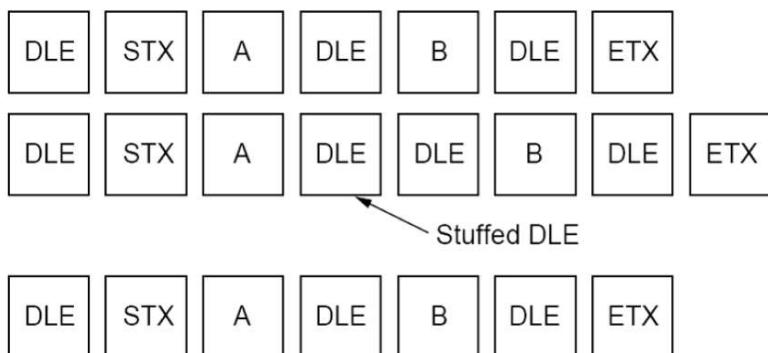
Uma dificuldade que pode ocorrer com essa técnica é que o campo de dados representa as informações do usuário, e a camada de enlace não tem controle sobre elas. Assim, pode estar presente no campo de dados o padrão idêntico ao do caractere ETX. Ao receber o quadro e percorrê-lo, o receptor interpretaria esse ETX como fim do quadro, o que seria um erro de interpretação.

Qual é a solução para esse problema?

A solução é, em primeiro lugar, a utilização de outro caractere especial (DLE) para indicar que, imediatamente após esse caractere, aparecerá o caractere delimitador (STX ou ETX). Dessa forma, um início de quadro seria marcado como DLE STX e um fim de quadro por DLE ETX. Isso ainda não resolve o problema, pois o DLE também pode estar presente no campo de DADOS do usuário.

A solução completa é implementada da seguinte forma: ao gerar o quadro, o transmissor percorre o campo de DADOS do usuário em busca do padrão DLE. Encontrando esse padrão, ele insere no campo de dados outro DLE (operação conhecida como *caracter stuffing*), e segue normalmente com a construção do quadro.

Ao receber o quadro, o receptor analisa os caracteres do quadro e, ao se deparar com um DLE, ele verifica qual é o próximo caractere. Caso seja outro DLE, ele sabe que este foi inserido pelo transmissor. Assim, ele exclui esse DLE e continua varrendo o quadro. Caso o caractere seguinte não seja outro DLE, mas um marcador (por exemplo, ETX), ele sabe que a marcação está correta. A imagem abaixo exemplifica esse processo de *caracter stuffing*.

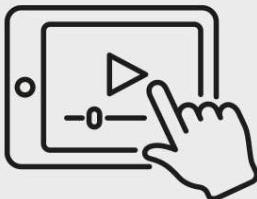


Enquadramento por caractere, técnica conhecida como *caracter stuffing*.

Uma desvantagem da técnica de enquadramento por caractere é ser orientada completamente pela existência e pelo reconhecimento de caracteres. Uma alternativa similar a essa é o enquadramento por bit, onde não há a necessidade de se trabalhar com caracteres, mas, sim, com bits de dados.

Enquadramento por bit

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Nessa técnica, o delimitador de quadros é o *flag* – sequência padrão de bits, geralmente 01111110. Cada quadro começa e termina com uma marca *flag*. Havendo falta de sincronismo por algum motivo, tudo o que o receptor tem a fazer é procurar por um *flag* para ficar sincronizado com o transmissor novamente.

De forma análoga à técnica anterior, aqui também ocorre o *stuffing*. O transmissor percorre o campo de DADOS todo e, ao perceber uma sequência de 5 bits “1”, ele insere um bit “0”, para quebrar o padrão de *flag*. Ao percorrer o quadro e identificar 5 bits “1” seguidos, o receptor fica alerta; se o próximo bit for “0”, ele sabe que esse bit foi inserido pelo transmissor, caso contrário (o próximo bit for “1”) ele sabe que se trata de um delimitador de quadro, *flag*.

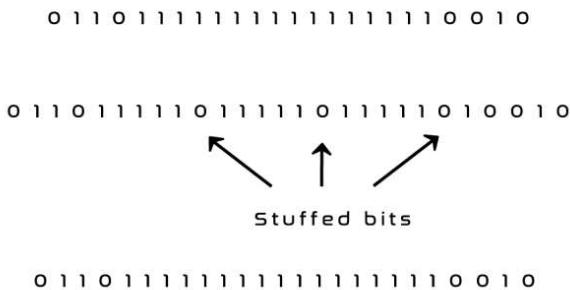


Ilustração da técnica bit stuffing.

Violação de códigos do nível físico

A última técnica de enquadramento estudada é conhecida como violação de códigos do nível físico. A ideia é bastante simples: na transmissão do sinal no meio físico, o bit “1” é representado por alguma característica ou variação do sinal, e o bit “0”, por outra.

Se o sinal puder apresentar ainda outras variações que não sejam utilizadas para codificar os bits, essas variações podem ser utilizadas para marcar o início e o fim do quadro, tendo em vista que não serão confundidas com os bits propriamente ditos.

Um exemplo é a codificação Manchester padronizada pelo IEEE para redes locais. Nesta codificação, o bit “1” é representado por uma transição do sinal de alto para baixo, e o bit “0”, pela transição contrária do sinal de baixo para alto. Assim, as outras duas transições (ou ausência de transições), de baixo para baixo e de alto para alto, estão livres para serem usadas como marcadores de quadro.



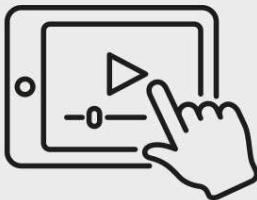
Codificação Manchester. Transições alto-alto e baixo-baixo não são usadas.

Agora que você estudou as técnicas de delimitação de quadros, vamos ver o controle de erros no nível de enlace.

Controle de erros (codificação)

Existem duas estratégicas básicas para o controle de erro no nível de enlace: *open loop* (malha aberta, sem canal de retorno) e *feedback* (malha fechada, com canal de retorno).

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Open loop

Na estratégia de *open loop*, a **detecção e correção** de erros são feitas completamente pelo receptor. São empregados códigos especiais (FEC: *Forward Error Correction*) para inserir informação redundante no quadro. Tudo isso para que, ao receber um quadro, o receptor:

- Possa usar a codificação para verificar a integridade do quadro;
- Havendo algum problema, possa, por si só, alterar o quadro para a forma correta.

A desvantagem dessa técnica é a necessidade de se inserir grande quantidade de informação redundante no quadro, de forma que o receptor possa executar as duas tarefas listadas acima sozinho. No entanto, pode ser a única solução, caso a transmissão não tenha canal de retorno.

Exemplo

O código hamming é o exemplo mais simples de código de correção de erros.

Feedback

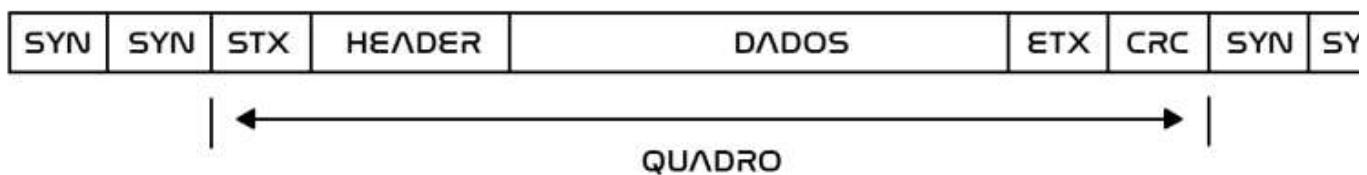
A estratégia *feedback* emprega apenas códigos de detecção de erros, isto é, insere informação redundante que seja suficiente apenas para o receptor testar a integridade do quadro. Havendo um problema, o receptor solicita ao transmissor que retransmita aquele quadro. Assim, é necessário haver um canal de retorno do receptor ao transmissor, situação comum em redes de dados, pois as estações geralmente precisam transmitir e receber dados.

Um exemplo simples de código de detecção de erros é o bit de paridade, que é inserido ao final do quadro. Assumindo a escolha da paridade par, o transmissor, ao transmitir o quadro, verifica a quantidade de bits “1” presentes nele. Se houver um número par de números 1, a paridade estará correta, e o bit de paridade receberá o valor “0”. Caso haja um número ímpar de bits “1” a ser transmitido no quadro, o transmissor fechará a paridade par inserindo o bit “1” no campo do bit de paridade. Ao receber o quadro, o receptor deve checar a paridade; se não for par, certamente houve algum problema com a recepção do quadro, e ele deve solicitar uma nova transmissão deste mesmo quadro.



O bit de paridade, apesar de ser simples e de fácil implementação, não é eficaz em muitos casos, como, por exemplo, na situação em que houve um problema no sinal, fazendo com que o receptor interprete erradamente dois bits do quadro. Assim, quando o receptor fizer o teste, a paridade estará correta, e o receptor não perceberá o erro na recepção do quadro.

Dessa forma, outros códigos de detecção mais poderosos foram desenvolvidos e padronizados para uso em redes de computadores, como, por exemplo, o CRC (Verificação Cíclica de Redundância), conforme ilustrado no quadro sobre técnica de enquadramento por caractere. (STALLINGS, 2004)



Enquadramento por caractere.

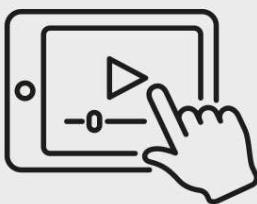
Depois de termos estudado as técnicas de enquadramento e codificação, entendemos como os quadros podem ser formados e como o receptor é capaz de verificar se houve ou não erro na recepção do quadro. Falta agora estudarmos como as retransmissões são realizadas automaticamente por meio de protocolos de enlace.



Construção de protocolos

Confira agora a construção de um desses protocolos gradativamente, acrescentando apenas a cada passo a função estritamente necessária para o seu funcionamento.

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Controle de fluxo

Outra operação que pode ser implementada aproveitando-se dos protocolos ARQ é o **controle de fluxo**.

O objetivo desse controle é evitar que um transmissor mais rápido acabe sobrecarregando um receptor mais lento com o envio de quadros a uma velocidade mais rápida que o receptor é capaz de suportar, causando um “afogamento” no receptor.

Esse descompasso não é desejável, pois o receptor vai acabar descartando os quadros novos e o transmissor teria que retransmiti-los em um outro momento.

Uma forma do receptor dosar a velocidade de transmissão de quadros quando estiver empregando os protocolos da família ARQ é simplesmente retardando o envio dos ACKs.

Dessa forma, o receptor consegue reduzir a velocidade com que novos quadros são inseridos no canal por parte do transmissor. O receptor pode inclusive reter todos os ACKs em determinado momento o que causaria timeouts no transmissor e a pausa na transmissão de novos quadros.

Assim que o receptor estivesse pronto, bastaria enviar os ACKs para que a comunicação fosse reestabelecida e seguisse com os novos quadros.

Falta pouco para atingir seus objetivos.

Vamos praticar alguns conceitos?

Questão 1

Complete a frase a seguir:

A técnica de enquadramento

- A por contagem de caractere garante o sincronismo entre o transmissor e o receptor.
- B por caractere exige que o receptor insira um caractere DLE a cada DLE que aparecer no campo de DADOS.
- C por violação de códigos do nível físico utiliza sinais especiais não empregados na codificação dos bits.
- D por bit não é mais empregada atualmente.
- E é utilizada para realizar a detecção e correção de erros.

Parabéns! A alternativa C está correta.

Essa técnica de enquadramento se aplica quando o nível físico apresenta redundância da codificação, ou seja, além dos códigos que representam os bits “0” e “1” existem outros códigos não utilizados para representar a informação. Desta forma, esses códigos redundantes podem ser empregados para delimitar o início e o fim dos quadros (enquadramento).

Questão 2

Considerando os passos estudados na construção do protocolo *Stop-and-Wait ARQ*, podemos afirmar que:

- A O campo necessário para numerar os quadros é de apenas um bit.
- B O *timeout* deve ser escolhido de forma a não exceder o tempo de transmissão de um quadro.

- C A utilização de ACKs numerados é opcional.
- D O protocolo é considerado de alto desempenho.
- E o protocolo pode ser utilizado em canais simplex, ou seja, que só transmitem em uma direção.

Parabéns! A alternativa A está correta.

Com o campo de um bit é possível numerar os quadros com os números “0” e “1”, o que é necessário para o corretor funcionamento do protocolo *stop-and-Wait ARQ*.



3 - Subcamada de acesso

Ao final deste módulo, você será capaz de descrever a subcamada de acesso a meio.

A subcamada MAC da camada de enlace

Camada MAC



Serviços da camada MAC

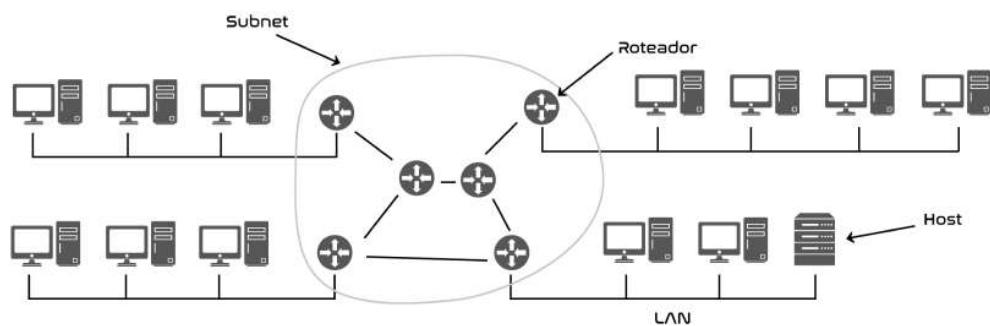
Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Como vimos, a camada de enlace é subdividida em duas subcamadas: **LLC (Controle de Enlace Lógico)** e **MAC (Controle de Acesso ao Meio)**, para lidar com o problema de acesso em enlaces multiponto, tema deste módulo. Vamos conferir?

A imagem abaixo ilustra uma rede de computadores composta de quatro redes locais (LANs) conectadas por uma sub-rede. Na sub-rede, os roteadores são conectados por enlaces ponto a ponto, enquanto nas LANs as estações estão ligadas a enlaces multiponto.

Os enlaces ponto a ponto são dedicados e o fluxo de informação segue sempre de um único transmissor a um único receptor. Já os enlaces multiponto são de uso compartilhado entre transmissores e receptores diferentes.



Rede de computadores com quatro redes locais (LANs) conectadas por uma sub-rede e empregam enlaces multiponto (broadcast).

Nas ligações multiponto, o enlace é compartilhado por diversas estações, porém, para que uma transmissão seja recebida com sucesso pela estação receptora, é necessário que cada estação transmissora envie seus dados em momentos diferentes.

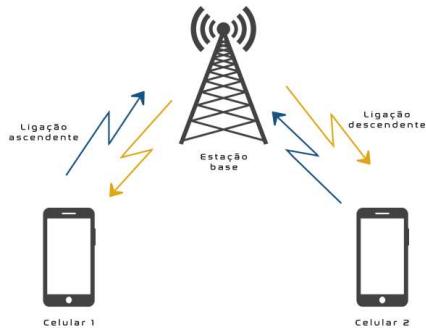
Havendo mais de uma transmissão ao mesmo tempo no enlace multiponto, a estação receptora não terá condições de decodificar o sinal – fenômeno conhecido como **colisão**.

Dessa forma, em enlaces multiponto, é necessário haver uma regra de acesso a fim de organizar as transmissões, evitando (ou minimizando), com isso, as colisões.

O uso do recurso compartilhado, no caso o enlace multiponto, requer o emprego de protocolos de controle de acesso ao meio, o que constitui a principal função da subcamada MAC.

Em suma, o controle de acesso ao meio se faz necessário sempre que houver contenção (disputa) de múltiplas estações pelo acesso ao meio de transmissão.

Exemplo de uso compartilhado do enlace:



Redes móveis celulares nas quais o uplink (canal de subida dos terminais celulares para a estação-base) é compartilhado pelos usuários móveis.

Controlando o acesso ao meio

Como solucionar os problemas

As soluções para o problema de compartilhamento de enlaces entre múltiplas estações podem ser divididas em três grandes grupos:



Alocação estática



Conteúdo



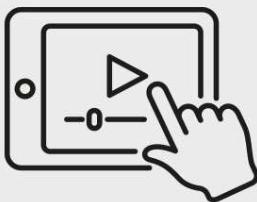
Acesso ordenado



Compartilhamento de enlaces

Confira agora as soluções para problemas de compartilhamento de enlaces.

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



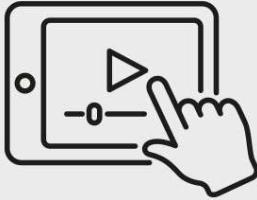
Vejamos os protocolos que aplicam essas soluções.

Protocolos baseados em alocação estática

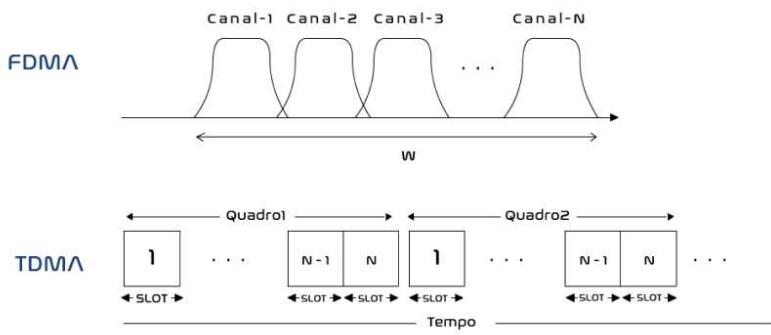


Alocação estática

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



A imagem abaixo apresenta duas técnicas de alocação estática bastante comuns:



Técnicas de alocação estática do canal (FDMA e TDMA).

Entenda suas diferenças:

FDMA (Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência)

A largura de banda W do enlace compartilhado é dividida em N , formando, assim, N canais individuais. Cada estação transmissora, ao ingressar no sistema, recebe a alocação estática de um desses subcanais e pode utilizá-la de forma exclusiva com o seu par até o momento de desconexão.

TDMA (Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo)

A divisão ocorre em função do tempo, onde o tempo de uso do canal é dividido em N fatias (ou *slots*) de tempo. Cada estação recebe um *slot* designado a ela para as suas transmissões com a estação receptora.

Apesar de resolver o problema de compartilhamento do enlace, as técnicas de alocação estática, como as ilustradas anteriormente, apresentam algumas desvantagens:

- Existe um número máximo de estações que podem ser atendidas pelo sistema. No exemplo, esse número é representado por N . Com a chegada de mais uma estação ao sistema ($N+1$), ela será bloqueada por falta de recursos.
- Nessas técnicas, é comum haver desperdício de recursos. Imagine que determinada estação é alocada para utilizar determinado canal. Se essa estação, em algum momento, não tiver nada a transmitir, o canal ficará ocioso e não poderá ser utilizado por outra estação. Como o tráfego de dados ocorre em rajadas (períodos de muita atividade seguidos por períodos de silêncio), essas técnicas podem causar desperdícios significativos de recursos.

Tradicionalmente, elas são mais empregadas para o tráfego telefônico (voz), daí o seu uso ter sido mais difundido em redes de telefonia fixa e em redes de telefonia celular.

Protocolos que empregam contenção



Protocolos baseados em contenção

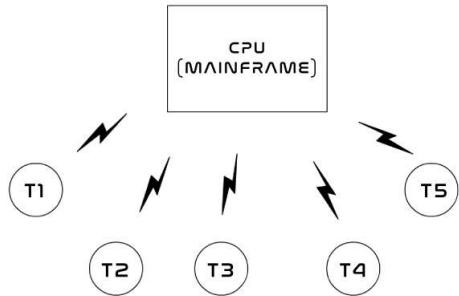
Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Um dos primeiros protocolos a empregar a contenção como técnica de compartilhamento do enlace foi o protocolo **ALOHA**, no início da década de 1970, na Universidade do Havaí (ABRAMSON, 2009).

A imagem abaixo ilustra o cenário de aplicação do protocolo **ALOHA** na época. Existia uma unidade central de processamento (um computador mainframe) que deveria ser acessada por terminais remotos espalhados pela universidade.

Observe que, nesse caso, ambos compartilhavam os recursos da CPU e do canal sem fio para as transmissões e acesso à CPU.



Cenário de aplicação do protocolo ALOHA.

A solução empregada para o acesso ao meio físico foi bastante direta. Se determinado terminal tivesse algo a transmitir, ele simplesmente faria isso usando a sua interface rádio sem qualquer tipo de regra ou restrição. Caso houvesse também outro terminal na mesma situação, a colisão seria certa. Nesse caso, o que precisaria ser feito era o tratamento da colisão.

O terminal a transmitir não sabia se a transmissão seria bem-sucedida ou não (colisão); tudo o que ele tinha a fazer era aguardar a confirmação (ACK) enviada no sentido contrário pela estação central (na imagem, CPU). Quando a confirmação era recebida, o terminal entendia que a transmissão foi um sucesso. Caso contrário, o terminal ficava ciente de que houve uma colisão com a transmissão de outro terminal.

O protocolo ALOHA determinava, então, que, em uma situação de colisão, o terminal precisaria sortear um número aleatório de espera e só poderia tentar novamente a transmissão após esse tempo. Como os intervalos de tempo de espera para cada terminal eram sorteados aleatoriamente, os terminais acabariam transmitindo em momentos diferentes, evitando novas colisões.

A solução empregada pelo protocolo ALOHA era bastante simples, e isso ocasionava baixo desempenho para a rede como um todo. O melhor desempenho teórico do protocolo ALOHA pode ser calculado como

18%, ou seja, na melhor hipótese, apenas 18% dos casos seriam caracterizados como transmissões bem-sucedidas (TANENBAUM, 2011).

O baixo desempenho do protocolo ALOHA motivou o desenvolvimento de protocolos mais elaborados:

S-ALOHA



A ideia imediata era reduzir os eventos em que as colisões pudessem ocorrer. Levando isso em consideração, foi desenvolvido o S-ALOHA (ALOHA com slots de tempo). Assim, o terminal só poderia transmitir algo sempre no início de cada slot, fazendo com que o número de eventos de colisão ocorresse apenas nesses momentos. O desempenho do S-ALOHA era duas vezes maior do que o desempenho do ALOHA, mas, ainda assim, isso era considerado muito baixo.

CSMA



Na tentativa de reduzir as colisões, foi desenvolvido o protocolo CSMA (acesso múltiplo com detecção de portadora). Para reduzir os eventos de colisão, os terminais que empregam o CSMA “escutam” o meio físico antes de transmitir e só realizam a transmissão ao perceberem que o meio está livre, ou seja, não existe outro terminal transmitindo naquele momento (não foi possível detectar a presença de algum sinal no meio).

As colisões ainda podem ocorrer no CSMA se o meio estiver livre e mais de um terminal estiver “escutando” o meio antes de transmitir. Com o meio livre, esses terminais transmitem ao mesmo tempo, gerando a colisão. A detecção de um evento de colisão acontece tal como no ALOHA, ao aguardar a confirmação ACK do terminal receptor. Havendo colisão, os terminais aguardam um intervalo de tempo sorteado aleatoriamente. Depois disso, tentam iniciar novamente a transmissão.

Na verdade, o CSMA é uma família de protocolos que podem ter variações quanto ao momento de iniciar uma transmissão no canal. Na imagem abaixo, relaciona em um gráfico o desempenho dos protocolos ALOHA, S-ALOHA e as variações do CSMA em um sistema teórico com cem terminais (TANENBAUM, 2011).

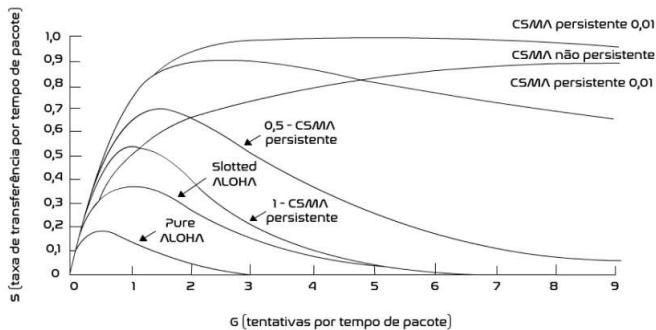


Gráfico: Desempenho dos protocolos para um sistema com cem terminais Tanebaum, 2011.

No eixo das ordenadas, o parâmetro S indica a proporção de eventos de transmissão com sucesso (de 0 a 1 ou, analogamente, de 0% a 100%), e, no eixo das abscissas G, a intensidade de tráfego que os terminais impõem ao canal (quantidade de pacotes de dados enviados pelos terminais a cada tempo).

Pode-se observar que a curva do ALOHA (na imagem, ele é chamado de *Pure ALOHA*) é a curva mais baixa e apresenta o seu pico (melhor resultado) em torno dos 18%, conforme já mencionado. É interessante observar também que, à medida que o G (intensidade de tráfego) aumenta, o desempenho do ALOHA diminui até entrar em pleno colapso – desempenho praticamente nulo. O mesmo ocorre para outras curvas, mas tal ponto de colapso é atingido para valores de intensidade de tráfego cada vez maiores, indicando melhores desempenhos em situações de mais alta carga. O destaque fica mesmo para o *0.01 persistent CSMA*, que apresenta, no cenário teórico de estudo, um desempenho de quase 100% (TANENBAUM, 2011).

Outro protocolo da família do CSMA que vale a pena destacar é o CSMA/CD (acesso múltiplo com detecção de portadora e detecção de colisão), que foi padronizado pelo IEEE por meio da série IEEE802.3 (ETHERNET), para ser utilizado em redes locais cabeadas.

IEEE

É a maior organização profissional do mundo, responsável por diversos padrões nos campos de engenharia elétrica, eletrônica e telecomunicações e pelo desenvolvimento tecnológico e da pesquisa nessas áreas.

ETHERNET

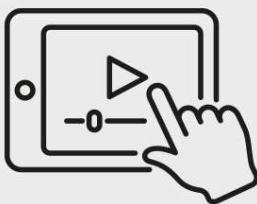
Lançado inicialmente em 1983 pelo IEEE, o padrão ETHERNET (IEEE 802.3) foi um padrão desenvolvido para as redes locais de computadores. Esse padrão utiliza o protocolo CSMA/CD com técnica de controle de acesso ao meio.

O CSMA/CD emprega uma função de detecção antecipada de colisão. Em vez de aguardar pela mensagem de reconhecimento (ACK), o CSMA/CD é capaz de perceber a ocorrência de uma colisão no momento em

que o terminal estiver transmitindo o seu próprio pacote de dados. Assim, é possível interromper antecipadamente uma transmissão que não teria sucesso. Essa detecção antecipada reduz os tempos de colisão, que ficariam ocupando desnecessariamente o canal.

Protocolos de acesso ordenado

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Na última categoria de protocolos, encontramos aqueles que garantem o acesso ordenado ao meio físico e, portanto, são livres de colisões.

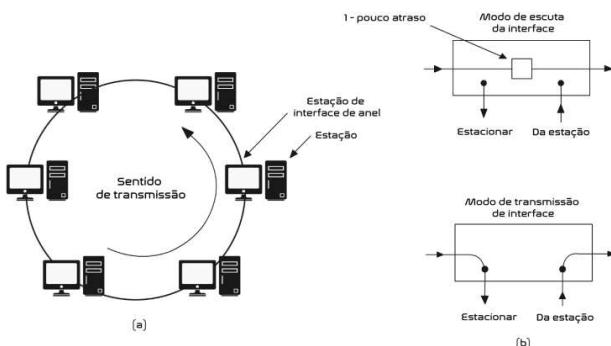
São várias as possibilidades dentro dessa categoria, mas nos concentraremos nos protocolos que utilizam passagem de permissão.

Permissão nada mais é do que um quadro especial que circula pela rede. Com isso, a estação que capturar a permissão terá o direito de realizar a transmissão.

Todas as outras estações que não possuem a permissão ficam impedidas de realizar uma transmissão no enlace compartilhado. Após a sua transmissão, a estação devolve a permissão para a rede, a fim de que outra estação consiga transmitir.

Dois protocolos de passagem de permissão foram padronizados pelo IEEE:

Token ring (passagem de permissão em anel)



Token ring. (a) Rede de passagem de permissão em anel; (b) Diagrama do funcionamento da interface de cada estação.

Podemos observar na imagem acima a topologia da rede em anel e o diagrama de funcionamento da interface, que serão descritas a seguir.

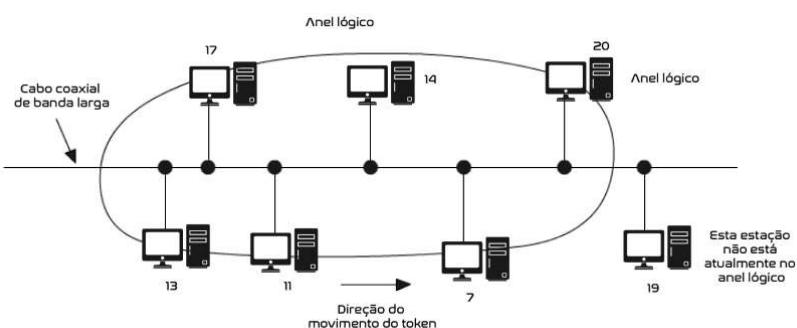
a) Topologia de rede de passagem de permissão em anel: As estações são conectadas em uma estrutura topológica em anel para que a permissão (*token*) possa circular pelo anel. Quando a estação deseja transmitir, ela captura a permissão e realiza a sua transmissão. Após esse momento, ela libera novamente a permissão para circular pelo anel e permitir que outra estação possa também receber a permissão e realizar a sua transmissão.

b) Diagrama do funcionamento da interface de cada estação: A imagem acima mostra o comportamento padrão da interface durante o modo de escuta do barramento em anel, enquanto a imagem inferior ilustra a interface da estação quando no modo de transmissão. Durante a transmissão, a estação abre a interface com o anel para capturar o *token* e também para inserir o seu quadro de informação no barramento.

O padrão IEEE 802.5 *token ring* especifica ainda uma série de modos de operação para o anel e as funções de gerência necessárias para o controle do *token*, contribuindo, assim, para o bom funcionamento da rede.

Token Bus (passagem de permissão em barra)

As redes de passagem em permissão em barra, padrão IEEE 802.4, são semelhantes às redes em anel, porém as estações são conectadas em um barramento. Elas caracterizam um bom exemplo de topologia física (conexão física das estações) em barra e topologia lógica (dada pelo funcionamento do protocolo) em anel, conforme ilustra a imagem a seguir.



Funcionamento do *Token Bus*.

A motivação para a padronização de tais redes veio do setor industrial e fabril, que opera com suas máquinas em linhas de produção, o que exige como pré-requisito uma rede com topologia em barra.

Nas redes *token bus*, as estações possuem um número de identificação (endereço físico) e cada estação conhece os endereços das estações vizinhas. Assim como no *token ring*, existe um quadro especial de controle (*token*) que regula o acesso ao meio de transmissão. A estação que possui o *token* (uma por vez – não há colisões) tem garantia de transmissão por determinado espaço de tempo. O *token* “circula” pelas estações no sentido decrescente dos endereços, formando um anel lógico.

Embora as tecnologias *token ring* e *token bus* não sejam mais utilizadas em redes locais, as soluções são elegantes e foram cuidadosamente especificadas e padronizadas.

O estudo das soluções se justifica, pois as técnicas de passagem de permissão têm emprego amplo na área de redes, principalmente em problemas de compartilhamento e alocação de recursos entre múltiplos usuários.

Falta pouco para atingir seus objetivos.

Vamos praticar alguns conceitos?

Questão 1

O protocolo ALOHA

- A apresenta bom desempenho.
- B é considerado como técnica de alocação estática.
- C permite colisões.
- D garante acesso ordenado ao meio.
- E é utilizada para realizar a detecção e correção de erros.

Parabéns! A alternativa C está correta.

No protocolo ALOHA, as colisões ocorrem e são previstas pela própria construção do protocolo.

Questão 2

Os protocolos da família CSMA

- A apresentam um desempenho superior ao ALOHA.
- B são considerados como técnicas de alocação estática.
- C não são mais empregados nos dias de hoje.
- D garantem acesso ordenado ao meio.
- E garantem que não haverá colisão.

Parabéns! A alternativa A está correta.

Os protocolos CSMA foram desenvolvidos após o ALOHA, e uma de suas finalidades é justamente a melhoria no desempenho.

Considerações finais

Este conteúdo cobriu os assuntos referentes à camada física e à camada de enlace da arquitetura de redes de computadores. Foram explorados diversos conceitos, problemas e soluções desenvolvidos para o

correto funcionamento dos protocolos nas redes de computadores. O conteúdo apresentado é fundamental para o entendimento da área e para possibilitar ao aluno uma visão ampla e crítica sobre o funcionamento das redes de computadores.

Podcast

Ouça agora explicações em formato de pergunta e resposta sobre o conteúdo estudado.

Para ouvir o áudio, acesse a versão online deste conteúdo.



Explore +

Para saber mais sobre o código *hamming*, consulte o livro *Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms*, dos autores Moon e Todd.

Referências

ABRAMSON, N. **The ALOHAnet** – Surfing for Wireless Data, IEEE Communications Magazine. 47(12): 21–25. Consultado na internet em: 23 jan. 2020.

BERTSEKAS, D.; GALLAGER, R. **Data Networks**. 2. ed. São Paulo: Prentice Hall, 1992.

KLEINROCK, L. **History of the Internet and its flexible future.** IEEE Wireless Communication. Vol. 15.

Consultado na internet em: 23 jan. 2020.

KUROSE, F.; ROSS, K. **Redes de Computadores e a Internet.** 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

MOON, TODD. **Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms,** John Wiley & Sons, 2005.

RAPPAPORT. T. **Wireless Communications: Principles and Practice.** 2. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2001.

STALLINGS, W. **Data and Computer Communications.** 7. ed. São Paulo: Pearson, 2004.

STALLINGS, W. **Redes e Sistemas de Comunicação de Dados.** 1. ed. São Paulo: Altabooks, 2018.

TANENBAUM, A. **Redes de Computadores.** 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

Material para download

Clique no botão abaixo para fazer o download do conteúdo completo em formato PDF.

[Download material](#)

O que você achou do conteúdo?



 Relatar problema