

Dentre os princípios subjacentes à comunicação por camada de enlace, examinamos técnicas de detecção e correção de erros, protocolos de acesso múltiplo, endereçamento de camada de enlace e a construção de redes locais ampliadas por hubs e comutadores. No caso da detecção/correção de erros, examinamos como é possível adicionar bits ao cabeçalho de um quadro para detectar e algumas vezes corrigir erros de mudança de bits que podem ocorrer quando o quadro é transmitido pelo enlace. Analisamos esquemas simples de paridade e de soma de verificação, bem como o esquema mais robusto de verificação da redundância cíclica. Passamos, então, para o tópico dos protocolos de acesso múltiplo. Identificamos e estudamos três abordagens amplas para coordenar o acesso a um canal *broadcast*: abordagens de divisão de canal (TDM, FDM, CDMA), abordagens de acesso aleatório (os protocolos ALOHA e os protocolos CSMA) e abordagens de revezamento (polling e passagem de permissão). Vimos que uma consequência do compartilhamento de um canal *broadcast* por múltiplos nós é a necessidade de prover endereços aos nós no nível da camada de enlace. Aprendemos que endereços físicos são bastante diferentes de endereços de camada de rede e que, no caso da Internet, um protocolo especial (o ARP — protocolo de resolução de endereço) é usado para fazer o mapeamento entre esses dois modos de endereçamento. Em seguida, examinamos como os nós que compartilham um canal *broadcast* formam uma LAN e como várias LANs podem ser conectadas para formar uma LAN de maior porte — tudo isso sem a intervenção de roteamento de camada de rede para a interconexão desses nós locais.

Também estudamos detalhadamente vários protocolos específicos de camada de enlace — Ethernet e PPP. Encerramos nosso estudo da camada de enlace focalizando como redes ATM e MPLS fornecem serviços de camada de enlace quando interconectadas com roteadores IP. Com isso, concluímos nossa jornada de cima para baixo da pilha de protocolos. É claro que a camada física fica abaixo da camada de enlace, mas provavelmente será melhor deixar os detalhes da camada física para outro curso (por exemplo, teoria da comunicação, em vez de redes de computadores). Contudo, discutimos brevemente vários aspectos da camada física — neste capítulo, por exemplo, discutimos a codificação Manchester na Seção 5.5, e no Capítulo 1, meios físicos na Seção 1.4. Consideraremos novamente a camada física quando estudarmos as características de enlaces sem fio no próximo capítulo.

Embora nossa jornada de cima para baixo da pilha de protocolos esteja encerrada, nosso estudo sobre rede de computadores ainda não chegou ao fim. Nos quatro capítulos seguintes, examinaremos rede sem fio, rede multimídia, segurança da rede e gerenciamento de rede. Esses quatro tópicos não se ajustam convenientemente a uma única camada; na verdade, cada um deles atravessa muitas camadas. Assim, entender esses tópicos (às vezes tachados de 'tópicos avançados' em alguns textos sobre redes) requer uma boa base sobre todas as camadas da pilha de protocolos — uma base que se completou com nosso estudo sobre a camada de enlace de dados!

## Exercícios de fixação

### Capítulo 5 Questões de revisão

#### Seções 5.1 a 5.2

1. Se todos os enlaces da Internet fornecessem serviço confiável de entrega, o serviço confiável de entrega TCP seria redundante? Justifique sua resposta.
2. Cite alguns possíveis serviços que um protocolo de camada de enlace pode oferecer à camada de rede. Quais desses serviços de camada de enlace têm serviços correspondentes no IP? E no TCP?

#### Seção 5.3

3. Suponha que dois nós comecem a transmitir ao mesmo tempo um pacote de comprimento  $L$  por um canal *broadcast* de velocidade  $R$ . Denote o atraso de propagação entre os dois nós como  $t_{prop}$ . Haverá uma colisão se  $t_{prop} < L/R$ ? Por quê?

4. Na Seção 5.3, relacionamos quatro características desejáveis de um canal *broadcast*. O slotted ALOHA tem quais dessas características? E o protocolo de passagem de permissão, tem quais dessas características?
5. Descreva os protocolos de polling e de passagem de permissão usando a analogia com as interações ocorridas em um coquetel.
6. Por que o protocolo de passagem de permissão seria ineficiente se uma LAN tivesse um perímetro muito grande?

#### Seção 5.4

7. Que tamanho tem o espaço de endereço MAC? E o espaço de endereço IPv4? E o espaço de endereço IPv6?
8. Suponha que cada um dos nós A, B e C esteja ligado à mesma LAN *broadcast* (por meio de seus adaptadores). Se A enviar milhares de datagramas IP a B com quadro de encapsulamento endereçado ao endereço MAC de B, o adaptador de C processará esses quadros? Se processar, ele passará os datagramas IP desses quadros para C (isto é, para o nó pai do adaptador)? O que mudaria em suas respostas se A enviasse quadros com o endereço MAC de *broadcast*?
9. Por que uma pesquisa ARP é enviada dentro de um quadro *broadcast*? Por que uma resposta ARP é enviada dentro de um quadro com um endereço MAC de destino específico?
10. Na rede da Figura 5.19, o roteador tem dois módulos ARP, cada um com sua própria tabela ARP. É possível que o mesmo endereço MAC apareça em ambas as tabelas?

#### Seção 5.5

11. Compare as estruturas de quadro das redes Ethernet 10BaseT, 100BaseT e Gigabit Ethernet. Quais as diferenças entre elas?
12. Suponha que um adaptador de 10 Mbps envie para dentro de um canal uma cadeia infinita de 1s usando a codificação Manchester. Quantas transições por segundo terá o sinal que emerge do adaptador?
13. Em CSMA/CD, após a quinta colisão, qual é a probabilidade de que um nó escolha  $K = 4$ ? O resultado  $K = 4$  corresponde a um atraso de quantos segundos em uma rede Ethernet de 10 Mbps?

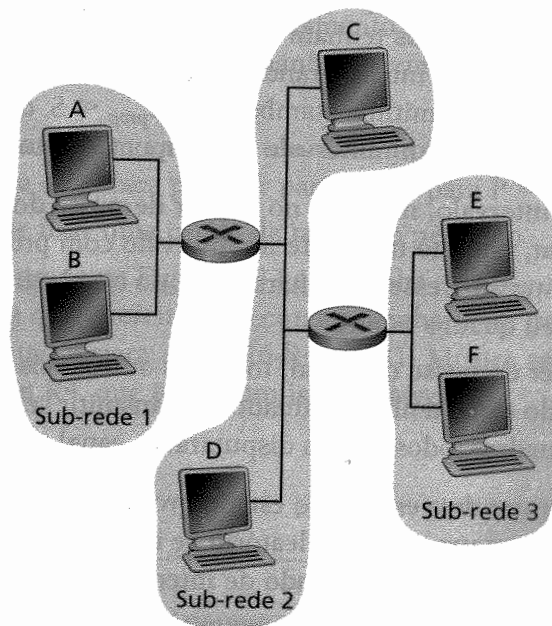


## Problemas

1. Suponha que o conteúdo de informação de um pacote seja o padrão de bits 10101010101011 e que um esquema de paridade par esteja sendo usado. Qual seria o valor do campo de soma de verificação para o caso de um esquema de paridade bidimensional? Sua resposta deve ser tal que seja usado um campo de soma de verificação de comprimento mínimo.
2. Dê um exemplo (que não seja o da Figura 5.6) mostrando que verificações de paridade bidimensional podem corrigir e detectar um erro de bit único. Dê um outro exemplo mostrando um erro de bit duplo que pode ser detectado, mas não corrigido.
3. Suponha que a porção de informação de um pacote ( $D$  da Figura 5.4) contém 10 bytes consistindo na representação binária sem sinal dos números inteiros de 0 a 9. Calcule a soma de verificação da Internet para esses dados.
4. Considere o gerador de 4 bits  $G$  mostrado na Figura 5.8 e suponha que  $D$  tenha o valor de 10101010. Qual é o valor de  $R$ ?
5. Na Seção 5.3, fornecemos um esboço da derivação da eficiência do slotted ALOHA. Neste problema, concluiremos a derivação.



- a. Lembre-se de que, quando há  $N$  nós ativos, a eficiência do slotted ALOHA é  $Np(1 - p)^{N-1}$ . Ache o valor de  $p$  que maximize essa expressão.
- b. Usando o valor de  $p$  encontrado em (a), ache a eficiência do slotted ALOHA fazendo com que  $N$  tenda ao infinito. Dica:  $(1 - 1/N)^N$  tende a  $1/e$  quando  $N$  tende ao infinito.
6. Mostre que a eficiência máxima do ALOHA puro é  $1/(2e)$ . Obs.: Este problema é fácil se você tiver concluído o anterior.
7. Plote em gráfico a eficiência do slotted ALOHA e do ALOHA puro como uma função de  $p$ , para  $N = 100$ .
8. Considere um canal *broadcast* com  $N$  nós e uma taxa de transmissão de  $R$  bps. Suponha que o canal *broadcast* use protocolo de polling (com um nó de polling adicional) para acesso múltiplo. Suponha que o intervalo de tempo entre o momento em que o nó conclui a transmissão e o momento em que o nó subsequente é autorizado a transmitir (isto é, o atraso de polling) seja  $t_{poll}$ . Suponha ainda que, dentro de uma rodada de polling, um dado nó seja autorizado a transmitir, no máximo,  $Q$  bits. Qual é a vazão máxima do canal *broadcast*?
9. Considere três LANs interconectadas por dois roteadores, como mostra o diagrama a seguir:
  - a. Faça um novo desenho do diagrama incluindo os adaptadores.
  - b. Atribua endereços a todas as interfaces. Para a Sub-rede 1, use endereços do tipo 111.111.111.xxx; para a Sub-rede 2, use endereços do tipo 122.222.222.xxx, e para a Sub-rede 3 use endereços do tipo 133.133.133.xxx.
  - c. Atribua endereços de MAC a todos os adaptadores.
  - d. Considere o envio de um datagrama IP do hospedeiro A ao hospedeiro F. Suponha que todas as tabelas ARP estejam atualizadas. Enumere todas as etapas como foi feito no exemplo de um único roteador na Seção 5.4.2.
  - e. Repita (d), admitindo agora que a tabela ARP do hospedeiro remetente esteja vazia (e que as outras tabelas estejam atualizadas).



10. Lembre-se de que, com o protocolo CSMA/CD, o adaptador espera  $K \cdot 512$  tempos de bits após uma colisão, onde  $K$  é escolhido aleatoriamente. Para  $K = 100$ , quanto tempo o adaptador espera até voltar à etapa 2 para uma Ethernet de 10 Mbps? E para uma Ethernet de 100 Mbps?

11. Suponha que os nós A e B estejam no mesmo segmento Ethernet de 10 Mbps e que o atraso de propagação entre os dois nós seja de 225 tempos de bit. Suponha que o nó A comece a transmitir um quadro e que, antes de terminar, o nó B comece a transmitir um quadro. O nó A pode terminar de transmitir antes de detectar que B transmitiu? Por quê? Se a resposta for sim, então A acredita, incorretamente, que seu quadro foi transmitido com sucesso, sem nenhuma colisão.  
*Dica:* suponha que no tempo  $t = 0$  tempo de bit, A comece a transmitir um quadro. No pior dos casos, A transmite um quadro de tamanho mínimo de  $512 + 64$  tempos de bit. Portanto, A terminaria de transmitir o quadro em  $t = 512 + 64$  tempos de bit. Então, a resposta será não, se o sinal de B chegar a A antes do tempo de bit  $t = 512 + 64$  bits. No pior dos casos, quando o sinal de B chega a A?
12. Suponha que os nós A e B estejam no mesmo segmento de uma Ethernet de 10 Mbps e que o atraso de propagação entre os dois nós seja de 225 tempos de bit. Suponha também que A e B enviem quadros ao mesmo tempo, que os quadros colidam e que, então, A e B escolham valores diferentes de  $K$  no algoritmo CSMA/CD. Admitindo que nenhum outro nó esteja ativo, as retransmissões de A e B podem colidir? Para nossa finalidade, é suficiente resolver o seguinte exemplo. Suponha que A e B comecem a transmitir em  $t = 0$  tempo de bit. Ambos detectam colisões em  $t = 225$  tempos de bit. Eles terminam de transmitir um sinal de reforço de colisão em  $t = 225 + 48 = 273$  tempos de bit. Suponha que  $K_A = 0$  e  $K_B = 1$ . Em que tempo B programa sua retransmissão? Em que tempo A começa a transmissão? (Nota: os nós devem esperar por um canal ocioso após retornar à etapa 2 — veja o protocolo.) Em que tempo o sinal de A chega a B? B se abstém de transmitir em seu tempo programado?
13. Considere uma Ethernet 100BaseT de 100 Mbps. Para ter uma eficiência de 0,50, qual deve ser a distância máxima entre um nó e o hub? Admita um comprimento de quadro de 64 bytes e que não há repetidores. Essa distância máxima também garante que um nó transmissor A poderá detectar se outro nó transmitiu enquanto A estava transmitindo? Justifique sua resposta. Como se compara sua distância máxima com a estabelecida pelo próprio padrão de 100 Mbps?
14. Neste problema, você derivará a eficiência de um protocolo de acesso múltiplo semelhante ao CSMA/CD. Nesse protocolo, o tempo é segmentado e todos os adaptadores estão sincronizados com os intervalos. Diferentemente do slotted ALOHA, contudo, o comprimento de um intervalo (em segundos) é muito menor do que um tempo de quadro (o tempo para transmitir um quadro). Seja  $S$  o comprimento de um intervalo. Suponha que todos os quadros tenham comprimento constante  $L = kRS$ , onde  $R$  é a taxa de transmissão do canal e  $k$  é um número inteiro grande. Suponha que haja  $N$  nós, cada um com um número infinito de quadros para enviar. Admitimos também que  $t_{prop} < S$ , de modo que todos os nós podem detectar uma colisão antes do final de um intervalo de tempo. O protocolo é como segue:

- Se, para um dado intervalo, nenhum nó estiver de posse do canal, todos os nós disputam o canal; em particular, cada nó transmite no intervalo com probabilidade  $p$ . Se exatamente um nó transmitir no intervalo, esse nó tomará posse do canal para os  $k - 1$  intervalos subsequentes e transmitirá seu quadro inteiro.
- Se algum nó estiver de posse do canal, todos os outros nós evitarão transmitir até que o nó que está de posse do canal tenha terminado de transmitir seu quadro. Assim que esse nó tiver transmitido seu quadro, todos os nós disputarão o canal.

Note que o canal se alterna entre dois estados: o estado produtivo, que dura exatamente  $k$  intervalos, e o estado não produtivo, que dura um número aleatório de intervalos. A eficiência do canal é, claramente, a razão  $k/(k + x)$ , onde  $x$  é o número esperado de intervalos consecutivos não produtivos.

- a. Para  $N$  e  $p$  fixos, determine a eficiência desse protocolo.
- b. Para  $N$  fixo, determine  $p$  que maximiza a eficiência.
- c. Usando o  $p$  (que é uma função de  $N$ ) encontrado em (b), determine a eficiência quando  $N$  tende ao infinito.
- d. Mostre que essa eficiência se aproxima de 1 quando o comprimento do quadro é grande.

15. Suponha que dois nós, A e B, estejam ligados às extremidades opostas de um cabo de 900 metros e que cada um tenha um quadro de 1.000 bits (incluindo todos os cabeçalhos e preâmbulos) para transmitir um ao outro. Ambos os nós tentam transmitir no tempo  $t = 0$ . Suponha que haja quatro repetidores entre A e B, cada um inserindo um atraso de 20 bits. Admita que a taxa de transmissão é 10 Mbps e que é usado um CSMA/CD com intervalos de backoff de múltiplos de 512 bits. Após a primeira colisão, A sorteia  $K = 0$  e B sorteia  $K = 1$  no protocolo de backoff exponencial. Ignore o sinal de reforço e o tempo de atraso de 96 bits.
- Qual é o atraso de propagação em um sentido (incluindo os atrasos de repetidores) entre A e B em segundos? Suponha que a velocidade de propagação do sinal seja  $2 \cdot 10^8$  m/s.
  - Em que tempo (em segundos) o pacote de A é completamente entregue em B?
  - Agora suponha que somente A tenha um pacote para enviar e que os repetidores sejam substituídos por comutadores. Suponha que cada comutador tenha um atraso de processamento de 20 bits além do atraso de armazenagem e repasse. Em que tempo, em segundos, o pacote de A é entregue em B?
16. Lembre-se de que o ATM usa pacotes de 53 bytes consistindo em 5 bytes de cabeçalho e 48 bytes de carga útil. Cinquenta e três bytes é um tamanho excepcionalmente pequeno para pacotes de comprimento fixo; a maioria dos protocolos de rede (IP, Ethernet, Frame Relay e assim por diante) usa pacotes que são, em média, significativamente maiores. Uma das desvantagens de um pacote de tamanho pequeno é que uma grande fração de largura de banda de enlace é consumida por bytes de cabeçalho; no caso do ATM, quase 10 por cento da largura de banda é 'desperdiçada' pelo cabeçalho ATM. Neste problema, investigamos por que foi escolhido esse pacote tão pequeno. Com essa finalidade, suponha que a célula ATM consista em  $P$  bytes de dados (possivelmente diferente de 48) e 5 bytes de cabeçalho.
- Considere o envio de uma fonte de voz codificada digitalmente diretamente sobre ATM. Suponha que a fonte esteja codificada a uma taxa constante de 64 Kbps. Admita que cada célula esteja integralmente cheia antes de a fonte enviá-la para dentro da rede. O tempo exigido para encher uma célula é o **atraso de empacotamento**. Determine, em termos de  $P$ , o atraso de empacotamento em milissegundos. Lembre que o tamanho da célula é igual a  $P + 5$  bytes.
  - Os atrasos de empacotamento maiores do que 20 milissegundos podem causar ecos perceptíveis e desagradáveis. Determine o atraso de empacotamento para  $P = 1.500$  bytes (correspondente, aproximadamente, a um pacote Ethernet de tamanho máximo) e para  $P = 48$  bytes (correspondente a uma célula ATM).
  - Calcule o atraso de armazenagem e repasse em um único comutador ATM para uma taxa de enlace  $R = 155$  Mbps (uma taxa de enlace popular para ATM) para  $P = 1.500$  bytes e  $P = 48$  bytes.
  - Comente as vantagens de usar uma célula de tamanho pequeno.
17. Considere a rede MPLS mostrada na Figura 5.42 e suponha que os roteadores R5 e R6 agora são habilitados para MPLS. Suponha que queremos executar engenharia de tráfego de modo que pacotes de R6 destinados a A sejam comutados para A via R6-R4-R2-R1. Mostre as tabelas MPLS em R5 e R6, bem como a tabela modificada em R4, que tornariam isso possível.

### Questões dissertativas

Você deve navegar na Web para responder às perguntas a seguir.

- Qual é a faixa de preço aproximada atual para um adaptador Ethernet de 10/100 Mbps? E para um adaptador Gigabit Ethernet? Compare esses preços com o preço de um modem discado de 56 kbps ou de um modem ADSL.

2. O preço de hubs e de comutadores geralmente é determinado segundo o número de interfaces (também denominadas *portas* no jargão da LAN). Qual é a faixa de preço aproximada atual por interface para um hub de 10 Mbps? Para um hub de 100 Mbps? Para um comutador composto apenas de interfaces de 10 Mbps? Para um comutador somente com interfaces de 100 Mbps?
3. Muitas das funções de um adaptador podem ser realizadas em software que executa no nó da CPU. Quais as vantagens e as desvantagens de deslocar essa funcionalidade do adaptador para o nó?
4. Utilize a Web para achar os números de protocolo usados em um quadro Ethernet para um datagrama IP e para um pacote ARP.
5. Leia as referências [Xiao, 2000; Huang 2002 e RFC 3346] sobre engenharia de tráfego utilizando MPLS. Relacione um conjunto de metas para a engenharia de tráfego. Quais dessas metas podem ser cumpridas somente com MPLS e quais delas são alcançadas utilizando protocolos existentes que não são MPLS? No último caso, quais são as vantagens que o MPLS oferece?



## Ethereal Lab

---

No Companion Website, [www.aw.com/kurose\\_br](http://www.aw.com/kurose_br) você encontrará duas tarefas de Ethereal Lab, em inglês, para este capítulo. A primeira examina a operação do protocolo IEEE 802.3 e o formato do quadro Ethernet. A segunda explora a utilização do protocolo DHCP que estudamos na Seção 5.4.3