5. Nível de Enlace

O nível de enlace, também conhecido como nível de ligações lógicas, é responsável pelas seguintes funções: controle de acesso ao meio físico, deteção de erros de transmissão, recuperação de falhas de transmissão e controle do fluxo de informações. No caso de redes locais, as duas primeiras funções são altamente dependentes do meio físico. Os padrões IEEE 802 dividem o nível de enlace em duas subcamadas: a de controle de acesso ao meio (MAC - medium access control) que já estudamos junto com o nível físico e a de ligações lógicas que agrupa as demais funções. Veremos mais adiante que estas funções podem ser implementadas em níveis superiores, o que permite o uso de um nível de enlace simplificado (ou até eliminar o nível de ligações lógicas).

5.1. Exemplos de nível de enlace

Existem muitos padrões de nível de enlace, mas apresentaremos dois que têm o maior interesse histórico e prático. Boa parte dos outros padrões representam apenas pequenas variações em relação a estes - mesmo o LLC, que será visto em mais detalhes, pode ser entendido como uma simplificação do HDLC.

5.1.1. BSC

Um protocolo muito usado para ligar computadores de grande porte a terminais é o BSC (binary synchronous communication - comunicação síncrona binária) desenvolvido pela IBM. A figura 5.1 mostra o formato dos pacotes do BSC.

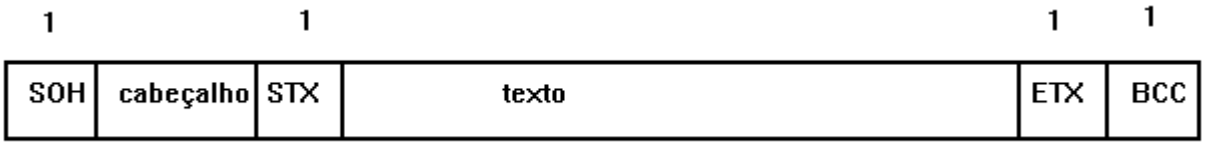

Figura 5.1 - Formato do PDU do BSC

Este protocolo usa os caracteres de controle para a delimitação do pacote: início de cabeçalho é o SOH (start of header - código 1 em ASCII), início do texto é STX (start of text - código 2) e fim de texto indicado por ETX (end of text - 3). O BCC (Block Character Check - checagem de bloco de caracteres) é calculado como a soma de todos os carateres do cabeçalho ao ETX e serve para detectar erros de transmissão. Um texto muito comprido pode ser quebrado em vários pacotes que terminam com ETB e um último pacote que termina com ETX. Como o nome do padrão indica que são transmitidas informações binárias, surge o problema de aparecer no meio do campo texto padrões que podem ser confundidos com algum caracter de controle. O caracter DLE (ASCII 16 decimal) é usado para garantir a **transparência** da informações: uma seqüência como DLE ETX indica apenas um caracter de valor 3 e um byte 16 é codificado como DLE DLE.

Para a recuperação de erros, é necessário haver um esquema de repetição de mensagens. Esta função é normalmente combinada com o controle de fluxo, que evita que o transmissor envie mensagens que o receptor não esteja preparado para receber. Isto pode ser conseguido se cada mensagem provocar uma resposta positiva (indicada por ACK - acknowledge) ou negativa (NACK - not acknowledge). Duas condições indicam a necessidade de retransmissão: o recebimento de um NACK ou a ausencia de qualquer resposta após "um tempo razoável". A escolha desse intervalo de tempo é complexa e deve levar

em conta a taxa de falhas de transmissão para maximizar o desempenho. Uma situação estranha ocorre quando o pacote é recebido corretamente mas o ACK atrasa muito ou é perdido (como os pacotes de controle usam exatamente os mesmos meios de comunicação que os dados, têm a mesma probabilidade de sofrer erros de transmissão). Nesse caso, a retransmissão do pacote é vista pelo receptor como uma nova mensagem com resultados possivelmente desastrosos. A solução do BSC é usar ACK0 para reconhecer os pacotes pares e ACK1 para o ímpares. A figura 5.2 mostra uma seqüência típica de troca de mensagens. O diagrama mostra o tempo no eixo vertical e todo o sistema constituído pelas camadas inferiores como uma caixa preta que liga o nível de enlace da máquina 1 ao nível de enlace da máquina dois. Este tipo de figura complementa as máquinas de estados finitos e as redes de Petri mostrando exemplos de operação de protocolos enquanto estes últimos mostram uma descrição completa, mas estática, de todas as operações possíveis.

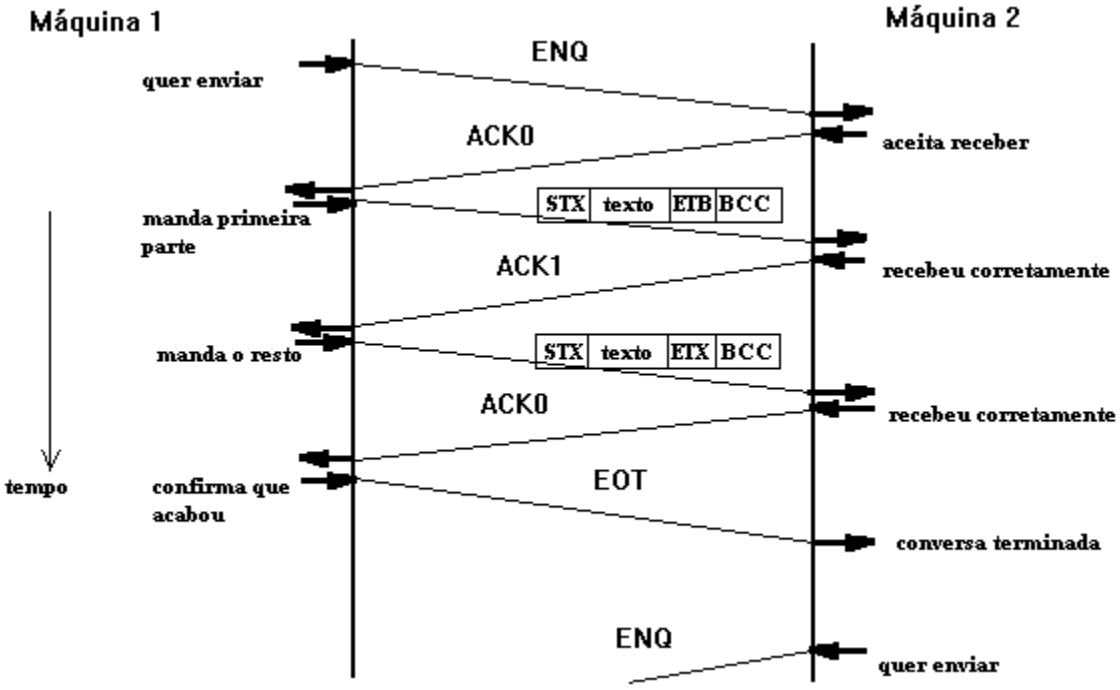

Figura 5.2 - Comunicação Típica no BSC

Note que o BSC supõe que o fluxo de informações é alternado, o que é muito razoável para pessoas usando terminais. Todos os outros protocolos que estudaremos são **balanceados**, isto é: os dados normalmente fluem igualmente nas duas direções ao mesmo tempo. O tempo entre o envio de um pacote e o seguinte pode ser muito grande se a **latência** (atraso entre o envio e o recebimento da mensagem) for significativa. As ligações seriais normalmente têm uma baixa taxa de comunicação e uma latência desprezível, mas as redes locais e sistemas como os satélites têm uma latência muito grande relativa a sua alta taxa de transmissão. A solução é sofisticar a idéia de mensagens pares/ímpares.

A figura não mostra o que acontece quando existem problemas de comunicação. Um pacote pode ser perdido ou chegar estragado. Nesse último caso um NACK substitui o ACK0/1 e a mensagem é retransmitida. A cada mensagem enviada é inicializado um contador de tempo e se o pacote, ou a resposta, for perdido o contador provoca a retransmissão das informações. Para que estas retransmissões sejam possíveis, o próprio nível de enlace precisa manter uma cópia da última mensagem enviada.

5.1.2. HDLC

A figura 5.3 mostra o formato dos pacotes do HDLC (High Level Data Link Control - controle de enlace de dados de alto nível). Este é o protocolo desenvolvido pela ISO para o nível de enlace. O byte 01111110 binário é chamado de flag e delimita o início e o fim de um pacote. Dois pacotes seguidos podem partilhar um mesmo flag (indicando o fim de um e início de outro) para melhorar a eficiência. O modelo de comunicação é de uma estação primária que controla o acesso ao meio e uma ou mais estações secundárias (que não se comunicam diretamente entre si). O campo de endereço identifica a estação secundária que deve receber o pacote ou que o está enviando. Este modelo se encaixa bem no caso de um computador de grande porte ligado a diversos terminais. No caso de duas máquinas equivalentes ligadas entre si o campo de endereço deixa de ter função. O campo de controle indica o tipo de informações sendo enviadas, mas sua semelhança com o LLC torna dispensável entrar em maiores detalhes aqui. O campo FCS (frame check sequence) de 16 bits permite confirmar a validade do pacote recebido.

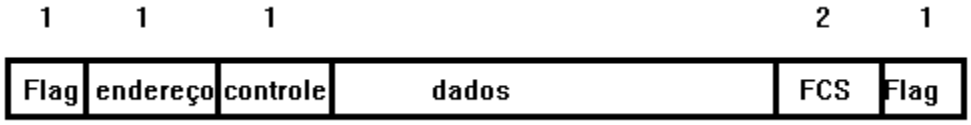

Figura 5.3 - PDU do HDLC

Uma questão interessante é que os dados e o FCS podem conter qualquer padrão de bits, incluindo o que indica os flags. A solução encontrada foi a de se inserir um zero extra depois de cinco uns seguidos. O receptor de ignorar estes bits a mais (isto normalmente é feito a nível de hardware de comunicação e é invisível ao resto do sistema). Assim, os bits 0101000000000111111111001101111101111000 seria enviado como 0101000000000111110111100110111111**0**101111000. A ineficiência resultante é bem pequena e se garante a transparência dos dados enviados e a exclusividade dos flags.

No Brasil, a comissão de Redes de Computadores da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) escolheu o HDLC para a interligação de redes. A figura 5.4 mostra três possibilidades de interconexão de redes: os repetidores, as pontes e os roteadores.

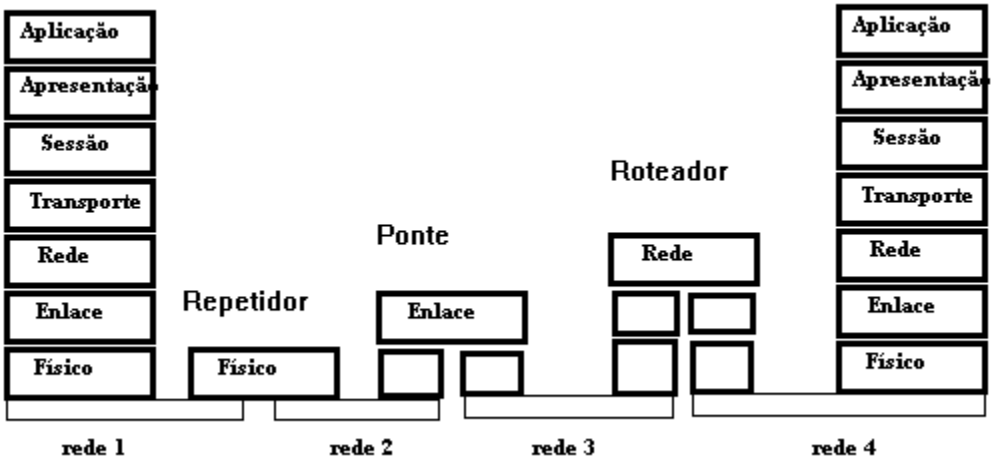

Figura 5.4 - Interligação de Redes de Computadores

O **repetidor** une as redes 1 e 2 amplificando as formas de onda que aparecem em uma e enviando para a outra. Isto permite ultrapassar os limites físicos do Ethernet, por exemplo. As redes devem ser do mesmo tipo e passam a formar uma única rede maior. A ponte exige que o nível de enlace das duas redes sejam iguais, mas elas podem ser de tipos diferentes (a rede 2 pode ser Ethernet e a 3 uma Token Ring, por exemplo). A **ponte** faz com que as máquinas de uma rede pareçam fazer parte da outra rede. Já o **roteador** não cria uma grande rede mas permite que as mensagens sejam explicitamente encaminhadas de uma rede para outra. Comparando as alternativas podemos dizer que os repetidores são bem limitados, as pontes são, em geral, ineficientes e os roteadores só podem ser usados se todos os nós tiverem o software adequado. É possível ligar duas redes muito diferentes pelo nível de aplicação com o uso de um **portal** (gateway) que não aparece na figura. Os portais são extremamente complexos e muito específicos para uma determinada aplicação e só são usados quando não existe nenhuma outra solução. É importante lembrar que a teminologia apresentada não é universal - muitos autores usam "gateway" para qualquer tipo de ligação entre redes.

Um projeto de uma ponte serve para ligar um tipo de rede a outro tipo bem específico. Supondo haver seis tipos de redes que podemos querer interligar (no início dos esforços de padronização existiam muitas redes proprietárias incompatíveis entre si) seria necessário projetar 21 pontes diferentes. Se as ligações se dessem através de uma rede intermediária padronizada, apenas 6 "meia-pontes" precisam ser desenvolvidos. A figura 5.5 mostra como fica esse esquema. O conversor funciona como uma espécie de nível de rede transparente que junta as redes 1 e 2 em uma só rede lógica. As duas meia-pontes formam uma ponte que pode ligar redes com nível de enlace diferentes, o que normalmente exigiria um roteador. O HDLC é usado em uma ligação ponto a ponto das duas meia-pontes e seu meio físico é o fator limitante do desempenho de todo o sistema. Em uma ponte normal a comunicação entre um meio físico e o da outra rede ocorre na memória interna do aparelho em uma velocidade muito maior do que a serial da figura. Com o domínio absoluto do Ethernet e do Token Ring, o número de pontes diferentes necessárias hoje é só três, o que torna as meia-pontes bem menos atraentes.

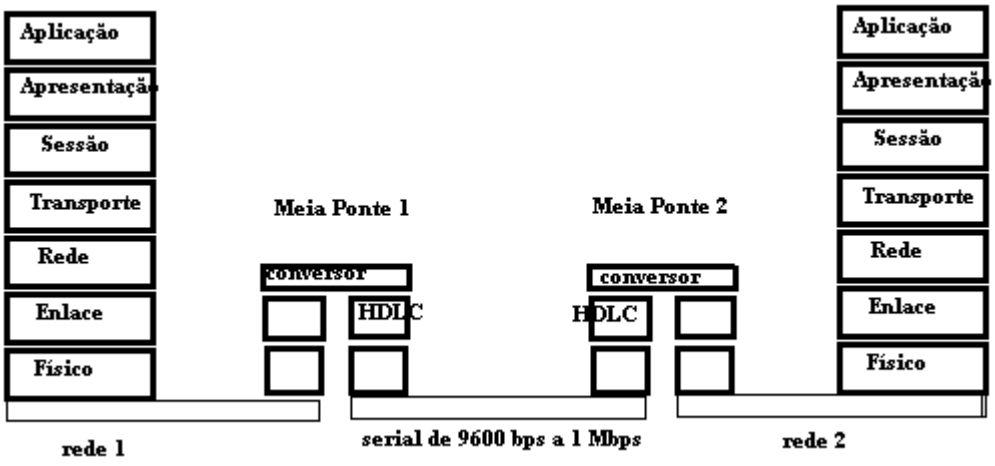

Figura 5.5 - Interligação de Redes por "Meia-Pontes"

5.1.3. SDLC e Outros

Muitos protocolos, como o SDLC (Synchronous Data Link Control) da IBM e outros (como o

LAPB - Link Access Protocol Balanced) são muito parecidos com o HDLC. O formato dos PDUs e mesmo o significado dos bits de controle são iguais. O LLC herda desta mesma tradição, mas não tem todos os tipos de pacotes destes protocolos.

5.2. IEEE 802.2 (LLC)

O protocolo IEEE 802.2 (Logical Link Control - controle da ligação lógica) é derivado dos padrões como o HDLC mas incorpora apenas as funções de alto nível da camada de enlace. O controle de acesso ao meio (MAC) e a verificação dos bits transmitidos ficam por conta do nível inferior das redes locais, como estudamos no capítulo anterior. A figura 5.6 mostra como se encaixa o LLC em uma rede Ethernet no modelo de referência ISO.

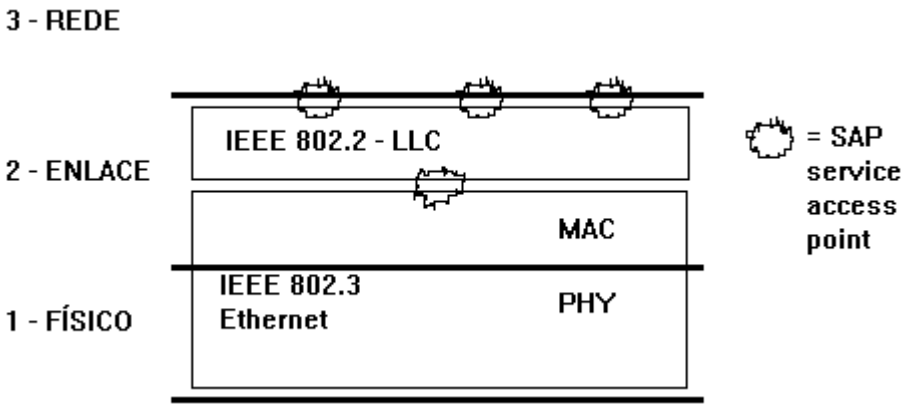

Figura 5.6 - Posição do LLC no Modelo de Referência

5.2.1. Formato das PDUs

A figura 5.7 mostra o formato das unidades de dados de protocolos (PDUs) usados no LLC. Campos como flags, BCC ou FCS não são necessários em função de já serem gerados no nível inferior pois o LLC foi projetado para ser usado com níveis físicos sofisticados. Um PDU que venha do MAC é considerado completamente livre de erros de transmissão.

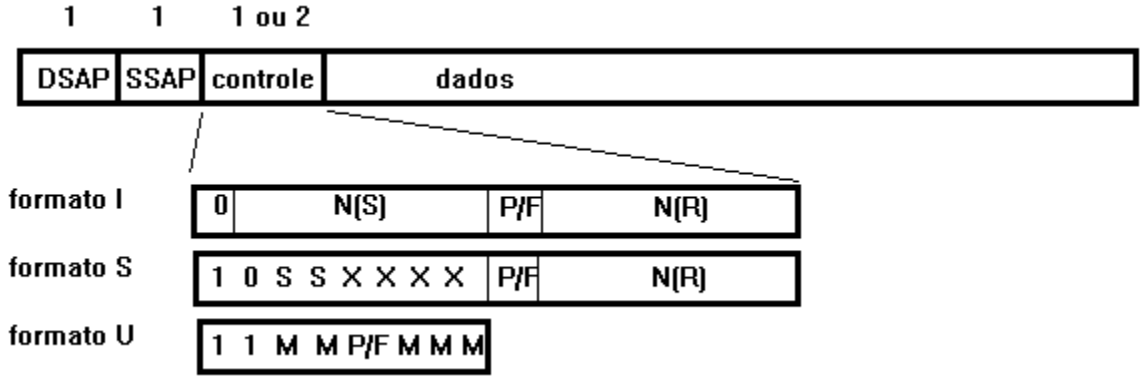

Figura 5.7 - PDUs do LLC

O campo DSAP indica qual ponto de acesso a serviço (SAP) com a camada de rede deve receber a informação. O SSAP é o SAP de origem. É importante notar que estes campos complementam o DA e o SA do pacote de nível físico. Um valor de DSAP é único apenas em determinada máquina e é repetido em outras máquinas. Na realidade esses endereços são de apenas 7 bits. O bit que sobra no DSAP indica se o endereço é individual ou de grupo e o bit do SSAP distingue pacotes de comando dos de resposta. Alguns endereços padronizados pelo IEEE (em hexadecimal): 00 - SAP nulo, 02 - gerenciamento individual do LLC, 03 - gerenciamento de grupo do LLC, 06 - protocolo de rede ARPANET (IP), 0E - inicialização e gerenciamento de rede PROWAY (IEC955), 8E - manutenção da lista de estações ativas PROWAY, 42 - protocolo de pontes em árvore (IEEE 802.1), AA - protocolo de acesso à sub-rede (SNAP), FE - protocolo de rede ISO (8473) e FF - SAP global.

5.2.2. Algorítmo da Janela

Um protocolo do tipo BSC sofre uma degradação enorme no desempenho a medida que aumenta a latência. A solução é permitir que sejam enviadas várias mensagens antes que seja necessário uma confirmação do recebimento. Observe o formato I da figura 5.7. O campo N(S) é um contador de 7 bits que é incrementado a cada pacote enviado (uma generalização do par/ímpar do BSC). Como a comunicação é balanceada, o campo N(R) das mensagens que voltam na outra direção é usado para confirmar o recebimento de pacotes sem a necessidade de gastar tempo de comunicação com uma mensagem ACK explícita. Dizemos que o campo de controle N(R) pega "carona" com o contrafluxo de dados. A figura 5.8 mostra como a adoção da possibilidade de até 3 mensagens com confirmação pendentes (uma "janela" de tamanho 3) melhora o desempenho em relação à janela 1.

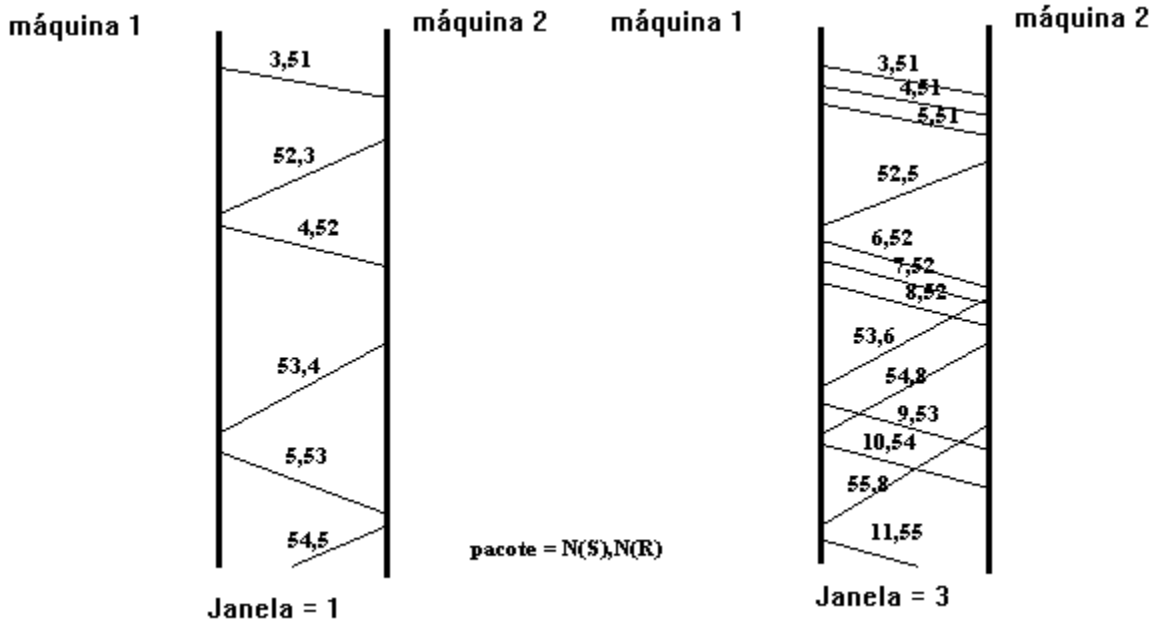

Figura 5.8 - Algorítmo da Janela

Os campos N(S) e N(R) são de 7 bits, o que permite janelas de até 128. Quanto maior a janela, melhor

é o desemepenho mas o transmissor deve guardar uma cópia de todas as mensagens enviadas mas não confirmadas. A maior parte das implementações trabalha com pouca memória, o que limita o tamanho máximo de janela possível. Se não houver resposta após um tempo razoável, o transmissor envia a mensagem novamente (se o receptor já havia recebido corretamente o campo N(S) vai permitir a detecção da duplicação do pacote). Para evitar que isto ocorra quando o outro lado simplemente não tem nada de útil para enviar pode ser enviado um pacote RR (Receiver Ready - receptor pronto) do formato S que tem um campo N(R). A figura 5.9 mostra que quando chega uma pacote com N(S) diferente do esperado é enviado um REJ (rejeição) para provocar a retransmissão.

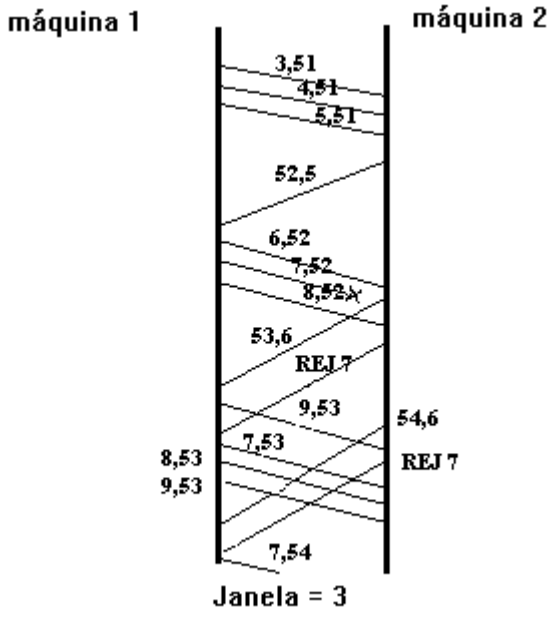

Figura 5.9 - Tratamento de Erros no LLC

No exemplo, o pacote 7 é perdido (os valores de N(S) e N(R) foram escolhidos para ser bem diferentes para tornar o exemplo mais claro, eles podem coincidir na prática). Ao receber o pacote 8 a máquina 2 reclama pedindo uma retransmissão do 7, que ela perdeu. Devido à latência, chega em seguida o 9 que também é rejeitado. A máquina 1 volta a enviar o 7, 8 e 9 mas recebe um REJ 7 devido ao primeiro 9 que enviou. Não sabendo que agora o 7 foi recebido corretamente ela envia o 7,8 e 9 uma terceira vez. Neste ponto volta tudo a funcionar corretamente já que a máquina 2 confirmará este pacotes. O exemplo exagerou a possível ineficiência do protocolo no caso de grandes latências mas a taxa de falhas em redes locais é muito pequena comparada com a de linhas seriais. Note que o pacote 8 e o 9 chegaram sem erros a primeira vez, mas foram descartados para facilitar a implementação do receptor (só o transmissor precisa ter "buffers" para todas as mensagens da janela; o receptor pode trabalhar com apenas uma de cada vez).

5.2.3. Circuitos Virtuais e Comutação de Pacotes

Existem duas versões do padrão LLC: a classe I e a classe II. A classe I define apenas três tipos de pacotes do formato U: o UI (Unnumbered Information - informação não numerada), o XID (eXchange IDentification - troque identificação) e TEST (teste). Os pacotes UI carregam dados do nível de rede

sem o algorítmo de janela. o XID permite obter informações sobre outras máquinas da rede e o TEST verifica a abilidade de se comunicar com outra máquina e descobrir se existem endereços duplicados do nível físico. A classe II contém a classe I e acrescenta os pacotes necessários para a implementação do controle de fluxo e correção de erros. O pacote XID permite descobrir a classe de LLC implementada em outra máquina e o tamanho da janela (se for o caso).

As duas classe representam duas filosofias diferentes de comunicações: a comutação de pacotes e os circuitos virtuais. Um exemplo de comutação de pacotes (ou serviço de "datagramas") é o correio. Cada mensagem é tratada independentemente de todas as outras e a perda de uma não tem efeito sobre as outras. Os cricuitos virtuais (ou "canais lógicos") são como o sistema telefônico.

O controle de fluxo só tem sentido no caso de circuitos virtuais e o impacto das duas técnicas sobre o roteamento de mensagens será abordado no próximo capítulo. Uma dúvida surge na figura 5.8: como as máquinas sabem o número do primeiro pacote da outra? A analogia com o telefone fornece a resposta: existem uma fase de chamada, uma fase de comunicação (o que aparece na figura) e uma fase de desconexão. O envio do pacote SABME (Set Asynchronous Balanced Mode Extended - inicialize o modo assíncrono balanceado extendido) estabelece uma chamada quando voltar uma resposta UA (Unnumbered Acknowledgment - confirmação não numerada). Nesse momento são inicializados os contadores e reservada a memória para os buffers necessários. Observe que os circuitos virtuais consomem memória e tempo de processamento mesmo entre dois pacotes de dados da mesma forma que uma chamada telefônica ocupa circuitos da central mesmo que nada esteja sendo dito no momento. Após a transmissão do último pacote deve ser enviado um DISC (Disconnect - desligue) que é respondido por um DM (Disconnect Mode - modo desconectado) para liberar todos estes recursos. O DM também pode ser enviado como resposta ao SABME quando não for possível estabelecer a comunicação.

O últmo pacote do LLC é o FRMR (FRaMe Reject - rejeição de quadro) que indica o recebimento de um PDU inválido ou com algum campo com valor errado. Estes pacotes e o algorítmo de janela permitem ao LLC II oferecer ligações lógicas sem perda de informações e sem problemas de alteração na ordem dos dados (quando você envia duas cartas pelo correio ela podem chegar fora de ordem - um problema da comutação de pacotes). Estas funções, no entanto, podem ser implementadas no nível de rede, de transporte ou até de aplicação. Quando isto ocorre, não há sentido em duplicar toda esta funcionalidade e é por isso que foi definido o LLC classe I.

Exercícios

1. Para que servem, respectivamente, os repetidores, as pontes e os roteadores?

2. Compare a comutação (ou chaveamento) de pacotes com circuitos virtuais.

3. Por que o padrão IEEE 802.2 (LLC) não possui um campo de checagem da transmissão (FCS) como os demais padrões de nível de enlace?

4. Os campos N(S) e N(R) são de 3 bits no HDLC normal. Qual o maior tamanho de janela possível nesse caso?

5. O que significa quando dizemos que um padrão está usando uma janela de tamanho 4?

6. O algorítmo de janelas cumpre duas das funções do nível de enlace. Quais são?

7. O padrão LLC classe I implementa a comutação de pacotes. A classe II acrescenta a técnica de circuitos virtuais. Compare as duas técnicas.

8. Nas redes locais, o nível de enlaçe permite várias máquinas partilharem um único meio físico. No caso de duas máquinas ligadas por uma interface serial RS 232 haveria ainda a necessidade de várias ligações lógicas partilharem a ligação física?

9. Por que o IEEE define que os padrões 802.3, 803.4 e 802.5 correspondem ao nível 1 e a metade do nível 2 OSI, enquanto que o 802.2 (LLC) corresponde à outra metade do nível 2?