

4.3 O que há dentro de um roteador?

- **Portas de entrada.** A porta de entrada tem diversas funções como a realização das funções de camada física de terminar um enlace físico de entrada em um roteador. Executa também as de camada de enlace. Além da função de exame e a tabela de repasse que é consultada para determinar a porta de saída do roteador à qual um pacote que chega será repassado por meio do elemento de comutação.
- **Elemento de comutação.** O elemento de comutação conecta as portas de entrada do roteador às suas portas de saída.
- **Portas de saída.** Uma porta de saída armazena os pacotes que foram repassados a ela através do elemento de comutação e, então, os transmite até o enlace de saída.
- **Processador de roteamento.** O processador de roteamento executa os protocolos de roteamento, mantém as tabelas de roteamento e as informações de estado do enlace, e calcula a tabela de repasse para o roteador. Ele também realiza funções de gerenciamento de rede.

Todos os elementos do roteador executam a função de repasse chamadas coletivamente de plano de repasse do roteador.

Fazendo uma analogia do repasse de pacotes com carros entrando e saindo de um pedágio. Vamos supor que, antes que um carro entre no pedágio, algum processamento seja necessário — o veículo para em uma estação de entrada e indica seu destino final. Um atendente na cabine examina o destino final, determina a saída do pedágio que leva a esse destino e diz ao motorista qual saída ele deve tomar. O carro entra no pedágio e por fim segue pela pista de saída indicada, onde poderá encontrar outros carros saindo do pedágio nessa mesma saída.

Nessa analogia, podemos reconhecer os componentes principais do roteador a pista de entrada e a cabine de entrada correspondem à porta de entrada; o pedágio corresponde ao elemento de comutação; e a pista de saída do pedágio corresponde à porta de saída. Com essa analogia, é instrutivo considerar onde poderiam acontecer os gargalos.

4.3.1 Processamento de entrada

As portas de entrada implementam funções de terminação de linha e processamento de enlace. A pesquisa realizada na porta de entrada é fundamental para a operação do roteador — é aqui que o roteador usa a tabela de repasse para determinar a porta de saída para a qual o pacote que está chegando será repassado pelo elemento de comutação. A tabela de repasse é calculada e atualizada pelo processador de roteamento, e uma cópia da tabela é comumente armazenada em cada porta de entrada. Com uma cópia da tabela de repasse em cada porta de entrada, as decisões de repasse podem ser feitas localmente, sem a necessidade de consultar o processador de roteamento a cada pacote, evitando assim um gargalo de processamento centralizado. Quando a porta de saída de um pacote tiver sido determinada por meio da pesquisa, ele pode ser enviado para o elemento de comutação.

4.3.2 Elemento de comutação

O elemento de comutação está no coração de um roteador. É por meio do elemento de comutação que os pacotes são repassados de uma porta de entrada para uma porta de saída e pode ser realizada de inúmeras maneiras:

- **Comutação por memória.** Nos primeiros roteadores, os pacotes eram copiados da porta de entrada para a memória central, processados pela CPU e então enviados para a porta de saída. Limitação: Apenas um pacote podia ser processado de cada vez, devido à limitação de largura de banda da memória.

Muitos roteadores modernos também comutam por memória. Contudo, a consulta do endereço de destino e o armazenamento do pacote na localização adequada da memória são realizados por processadores nas placas de linha de entrada.

- **Comutação por um barramento.** As portas de entrada transferem pacotes diretamente para as portas de saída através de um barramento compartilhado. Assim, ele é recebido por todas as portas de saída, mas somente a porta de destino manterá o pacote. Se vários pacotes chegarem ao roteador ao mesmo tempo, cada um em uma porta de entrada diferente, todos menos um deverão esperar, pois apenas um pacote pode cruzar o barramento de cada vez. Como cada pacote precisa atravessar o único barramento, a velocidade de comutação do roteador é limitada à velocidade do barramento;

- **Comutação por uma rede de interconexão.** Utiliza uma rede mais sofisticada, como uma crossbar é uma rede de interconexão que consiste em $2n$ barramentos que conectam n portas de entrada com n portas de saída, que permite a transferência simultânea de vários pacotes. Cada barramento vertical atravessa cada barramento horizontal em um cruzamento, que pode ser aberto ou fechado a qualquer momento pelo controlador do elemento de comutação. Quando um pacote chega da porta A e precisa ser repassado para a porta Y, o controlador do comutador fecha o cruzamento na interseção dos barramentos A e Y, e a porta A, então, envia o pacote para seu barramento, que é apanhado (apenas) pelo barramento Y. Observe que um pacote da porta B pode ser repassado para a porta X ao mesmo tempo, pois os pacotes A-para-Y e B-para-X usam diferentes barramentos de entrada e saída. Assim, diferentemente das duas técnicas de comutação anteriores, as redes do tipo crossbar são capazes de repassar vários pacotes em paralelo. Porém, se dois pacotes de duas portas de entrada diferentes forem destinados à mesma porta de saída, então um terá que esperar na entrada, pois somente um pacote pode ser enviado por qualquer barramento de cada vez.

4.3.3 Processamento de saída

O processamento de portas de saída toma os pacotes que foram armazenados na memória da porta de saída e os transmite pelo enlace de saída. Isso inclui a seleção e a retirada dos pacotes da fila para transmissão, com a realização das funções de transmissão necessárias nas camadas de enlace e física.

4.3.4 Onde ocorre formação de fila?

A formação de filas pode ocorrer nas portas de entrada e nas portas de saída de um roteador, dependendo da carga de tráfego, da velocidade do elemento de comutação e da taxa de linha. Quando as filas ficam muito grandes, a memória do roteador pode se esgotar, resultando na perda de pacotes.

Se o elemento de comutação não for rápido o suficiente para processar todos os pacotes que chegam, filas podem se formar nas portas de entrada. Imagine que a taxa de transmissão de entrada (R_{linha}) e a taxa de transmissão de saída sejam iguais, e que

haja N portas de entrada e N portas de saída. Se a taxa de comutação ($R_{\text{comutação}}$) for N vezes a taxa de linha (R_{linha}), as filas nas portas de entrada serão mínimas, pois o elemento de comutação conseguirá processar todos os pacotes antes que novos pacotes cheguem.

Mas o que pode acontecer nas portas de saída? Mesmo se a taxa de comutação for N vezes a taxa de linha, filas podem se formar nas portas de saída se muitos pacotes chegarem ao mesmo tempo, todos destinados à mesma porta de saída. Por exemplo, se N pacotes chegarem simultaneamente às portas de entrada, todos destinados à mesma porta de saída, formar-se-á uma fila nessa porta de saída. Isso acontece porque a porta de saída só consegue transmitir um pacote por vez. Se a fila continuar crescendo e não houver memória suficiente, pacotes serão descartados.

Quando há filas nas portas de saída, um escalonador de pacotes decide qual pacote transmitir primeiro. Isso pode ser feito de maneira simples (primeiro a chegar, primeiro a ser atendido - FCFS) ou de maneira mais sofisticada (fila ponderada justa - WFQ), que garante uma distribuição equitativa do tráfego.

De modo semelhante, se não houver memória suficiente para armazenar um pacote que está chegando, será preciso tomar a decisão de descartar esse pacote ou remover um ou mais já enfileirados para liberar lugar para o pacote recém-chegado. Várias políticas de descarte e marcação de pacotes (conhecidas coletivamente como algoritmos de gerenciamento ativo de fila) foram propostas e analisadas. Um dos algoritmos AQM mais estudados e executados é o de detecção aleatória rápida (random early detection — RED). Ele mantém uma média ponderada do comprimento da fila de saída. Se o comprimento médio da fila for menor do que um valor médio será admitido na fila. Inversamente, se a fila estiver cheia ou se o comprimento médio da fila for maior ou igual do que um valor médio, quando um pacote chegar, será marcado ou descartado.

Se o elemento de comutação não for veloz o suficiente (em relação às taxas da linha de entrada) para transmitir sem atraso todos os pacotes que chegam através dele, então poderá haver formação de fila também nas portas de entrada, pois os pacotes devem se juntar às filas nas portas de entrada para esperar sua vez de ser transferidos pelo elemento de comutação até a porta de saída.

um exemplo em que dois pacotes (mais escuros) à frente de suas filas de entrada são destinados à mesma porta de saída mais alta à direita. Suponha que o elemento de comutação escolha transferir o pacote que está à frente da fila mais alta à esquerda. Nesse caso, o pacote mais escuro na fila mais baixa à esquerda tem de esperar. Mas não é apenas este último que tem de aguardar; também tem de esperar o pacote claro que está na fila atrás dele (no retângulo inferior à esquerda), mesmo que não haja nenhuma disputa pela porta de saída do meio à direita (que é o destino do pacote claro). Esse fenômeno é conhecido como bloqueio de cabeça de fila (HOL — head-of-the-line blocking).