Routers IP

FEUP/MRSC/AMSR
MPR

Bibliografia

» Aula preparada com base seguinte bibliografia

- S. Keshav, “An Engineering Approach to Computer Networking”, Addison-Wesley, 1997
- L. Peterson and B. Davie, “Computer Networks”, Morgan Kaufmann, 2000
- S. Keshav, R. Sharma, “Issues and Trends in Router Design”
- C. Partridge et all, “A Fifty Gigabit per Second IP Router”
- Cisco White Paper, “The Evolution of High-End Router Architectures”
- N. McKeown, “Achieving 100% Throughput in an Input-Queued Switch”
- M. Ruiz-Sanchez, E. Biersack, W. Dabbous, “ Survey and Taxonomy of IP Address Lookup Algorithms”
- P. Gupta, S. Lin, N. McKeown, “Routing Lookups in Hardware at Memory Access Speeds”
- P. Gupta, N. McKeown, “Algorithms for Packet Classification”
- J. Mogul, K. Ramakrishnan, “Eliminating Receive Livelock in an Interrupt-driven Kernel”
- B. Chen, R. Morris, “Flexible Control of Parallelism in a Multiprocessor PC Router”
- S. Karlin, L. Peterson, “VERA: An Extensible Router Architecture”

Introdução

- Router → elemento de rede
  - » Usado para interligar redes heterogéneas, criando a ilusão de rede (IP) única
  - » Equipamento activo

- Função de um router
  - » Transferir pacotes: portas de entrada → portas de saída
  - » Mas também,
    - – Suportar tecnologias heterogéneas de rede (nível 2)
    - – Diferenciar os serviços de transporte
    - – Participar em algoritmos distribuídos de identificação de rotas

Routers

- Routers em todos os níveis de rede (IP)
  - » Redes de acesso → 
    - – Interligação de pequenas empresas/ clientes domésticos ao ISP (Internet Service Provider)
  - » Redes empresariais
    - – Interligam até dezenas de milhar de computadores
  - » Redes de transporte → 
    - – Interligam ISPs ou redes empresariais através de ligações longas
    - – Não directamente acessíveis a computadores
- Projecto de routers → requisitos diversos
  - » Redes de acesso
    - – Muitas portas. Heterogéneas. Variedade de protocolos
  - » Redes empresariais
    - – Baixo custo por porta. Muitas portas. Configuração fácil. Suporte de QoS
  - » Redes de transporte
    - – Encaminhar a velocidades elevadas para poucos links

Router de Transporte

- Interliga ISPs e grandes redes empresariais
- Custo de links de transmissão normalmente elevado ➔
  - » custo do router não constitui a maior restrição
- Requisitos importantes → fiabilidade e tempo de comutação
  - » Fiabilidade ➔ técnicas semelhantes às da rede telefónica
    - – Fonte de alimentação redundante
    - – Caminhos de dados duplicados (dentro do router)
  - » Tempo de comutação ➔ inspeção da tabela de encaminhamento
    - – Tabela de encaminhamento pode conter milhares de entradas

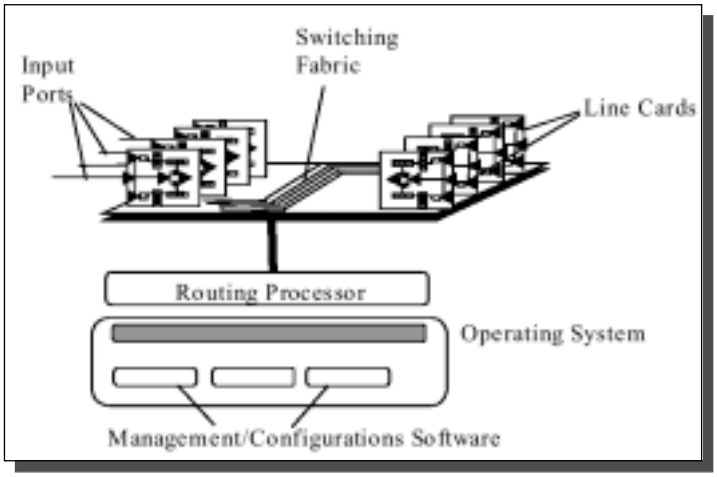
Router / Switch de Rede Empresarial

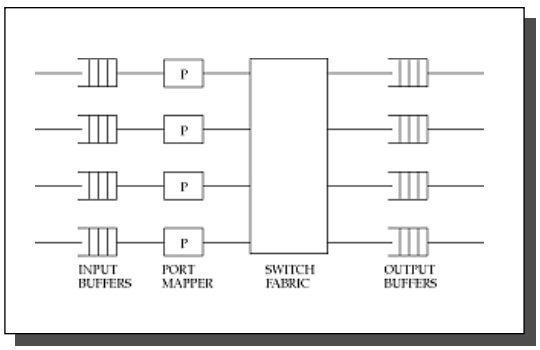
- Pode interligar número grande de portas
- Suporte de serviços diferenciados ➔ QoS dentro da empresa
- Suporte adicional de
  - » tráfego multicast
  - » múltiplos protocolos de rede (IPv4, IPv6, IPX)
  - » Firewalls, filtros de tráfego, políticas de segurança, VLANs

Router de Acesso

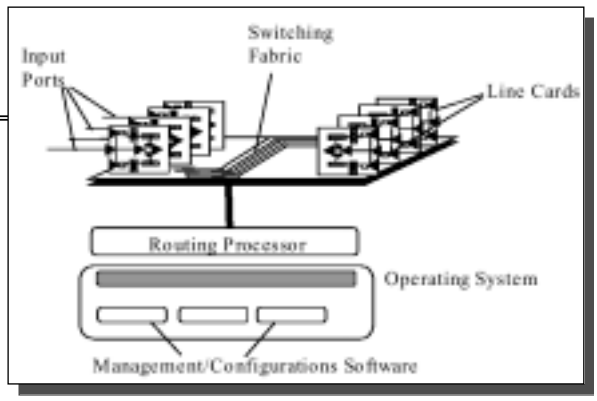
- Interliga utilizadores domésticos, pequenas empresas aos ISP
- Rede de acesso
  - » Tradicionalmente
    - bancos de modems,
    - interligados a concentradores de terminais,
    - servindo um grande número de ligações telefónicas de baixo débito
  - » Mudanças significativas
    - Tecnologia de acesso diversificada → modems de alta velocidade, ADSL e modems de cabo
    - Protocolos mais complexos em cada porta → SLIP, PPP + PPTP, IPSec
- Suporte de
  - » número elevado e heterogéneo de portas (podem ser de alto débito)
  - » Protocolos diversos e complexos
- Projecto complexo!

Modelização de um Router (Keshav)





Componentes de um Router



- Router genérico, 4 componentes
  - » Portas de entrada
    - – Ligação ao link físico. Entrada de pacotes.
    - – Portas agrupadas em cartas (4, 8, 16 portas)
  - » Portas de saída
    - – Armazena pacotes. Escalonamento de serviço no link de saída
  - » Comutador
    - – Interliga portas de entrada e saída
    - – Define o tipo de router
      - Fila à saída → $B_{comutador} > \sum B_{portaEntrada}$
      - Fila à entrada → $B_{comutador} < \sum B_{portaEntrada}$
  - » Processador de rotas
    - – Protocolos de routing . Criação de tabela de encaminhamento (de pacotes)

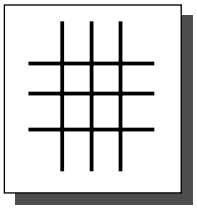
Porta de Entrada

- Desencapsulamento do nível 2
- Selecção da porta de saída
  - » Identificação de endereço de destino dos pacotes
  - » Inspecção da tabela de encaminhamento.
  - » Selecção da porta saída
- Classificação dos pacotes em classes pré-definidas
  - » garantias de QoS
- Implementação de protocolos de
  - » nível 2 (PPP, SLIP) ou 3 (PPTP, IPSec)
- Controlo do acesso ao comutador

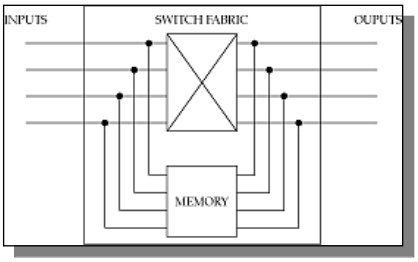
Comutador

» Barramento
- Interliga todas as portas de entrada e saída
- Débito limitado ➔
  - pela capacitância do barramento, por overhead da lógica de acesso

» Matriz
- 2N barramentos. N*N pontos de contacto
  - Transferência simultânea de pacotes
- Escalonador ➔
  - abre, fecha pontos de contacto
  - limita velocidade de comutação/ débito



» Memória partilhada
- Pacotes armazenados em memória partilhada
- Comutação de apontadores ou cabeçalhos
- Débito do comutador limitado pelos tempos de acesso à memória

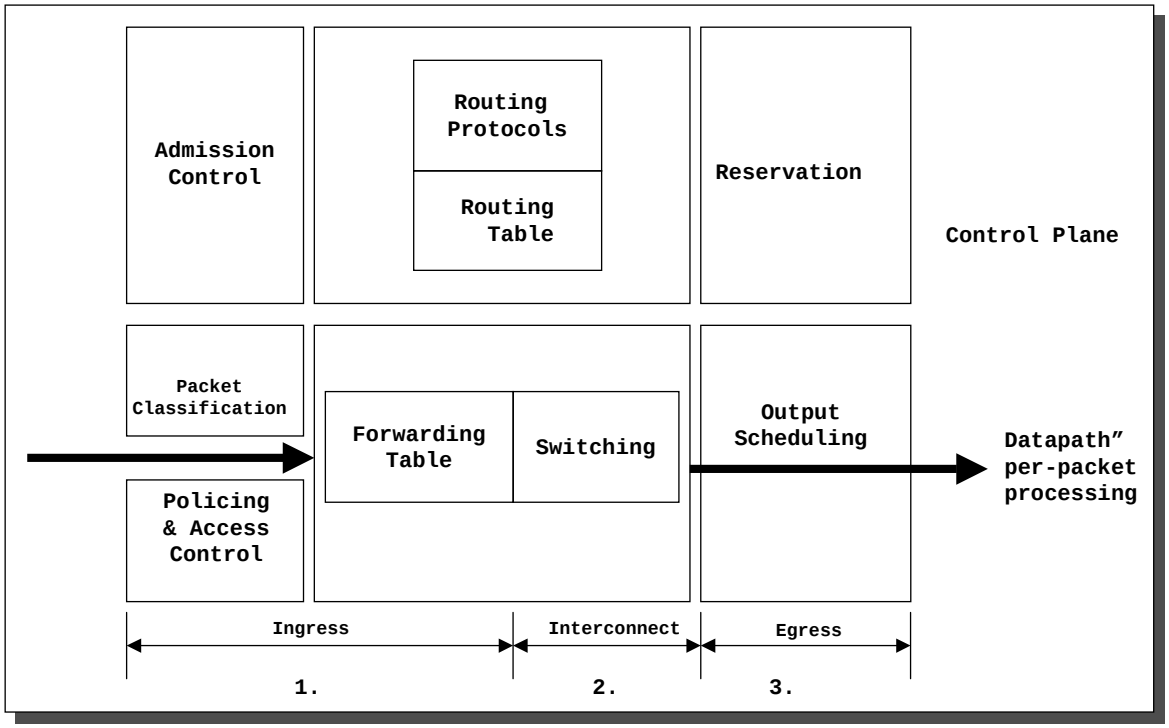


Porta de Saída, Processador de Rotas

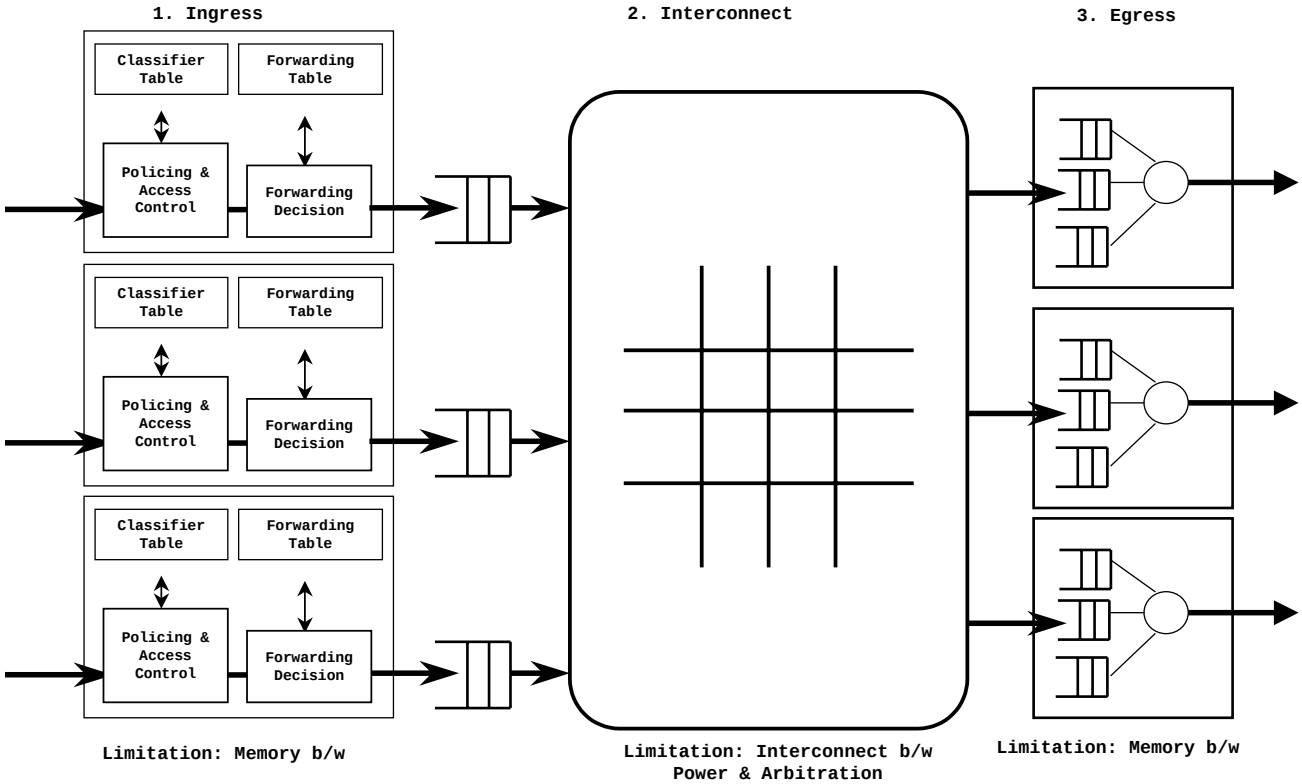
» Porta de saída
- Armazena pacotes antes da transmissão pelo link de saída
- Podem implementar algoritmos de escalonamento (prioridades, garantias)
- Encapsulamento e implementação de protocolos de nível 2

» Processador de rotas
- Calcula tabelas de rotas e de encaminhamento
- Executa protocolos de rotas
- Executa software de configuração e gestão do router
- Trata pacotes não explicitados na tabela de encaminhamento da carta de entrada

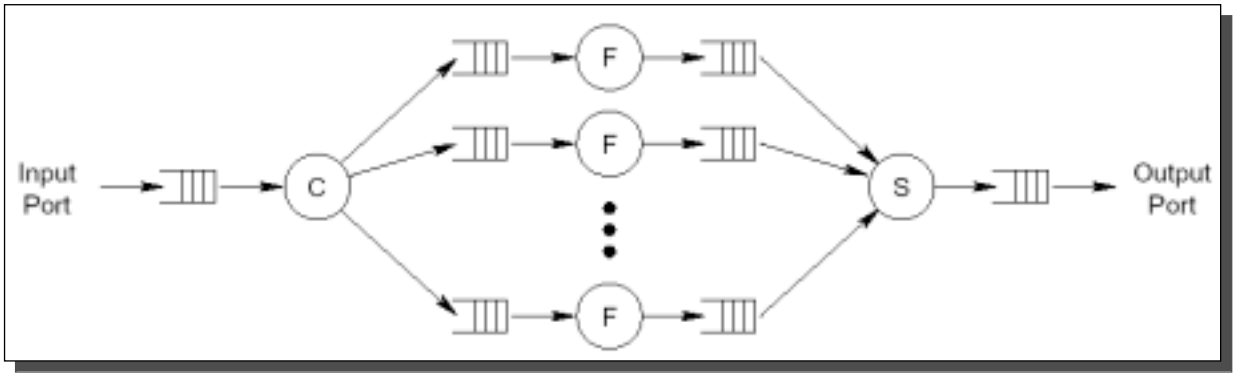
Representação Alternativa (McKeown)



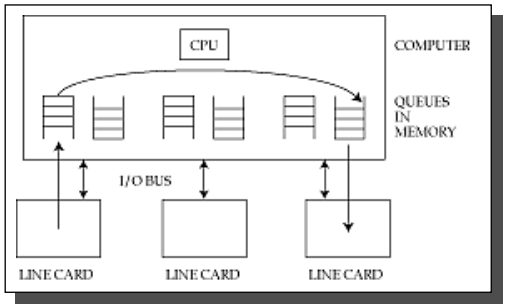
Representação Alternativa

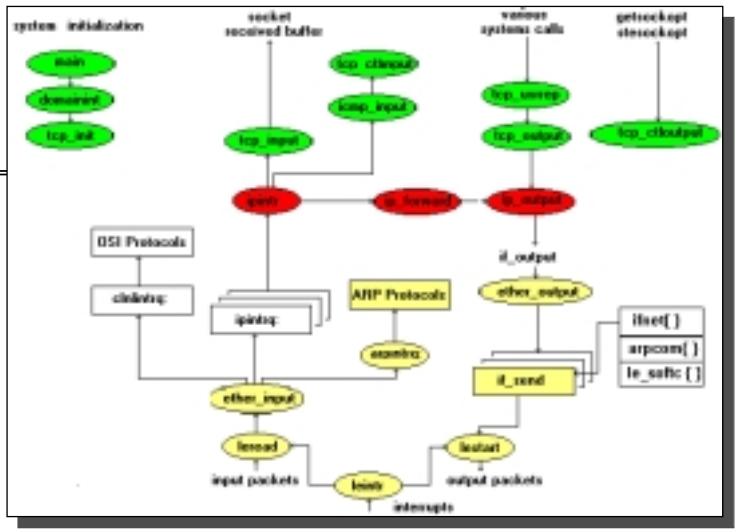


Router Virtual (Peterson)



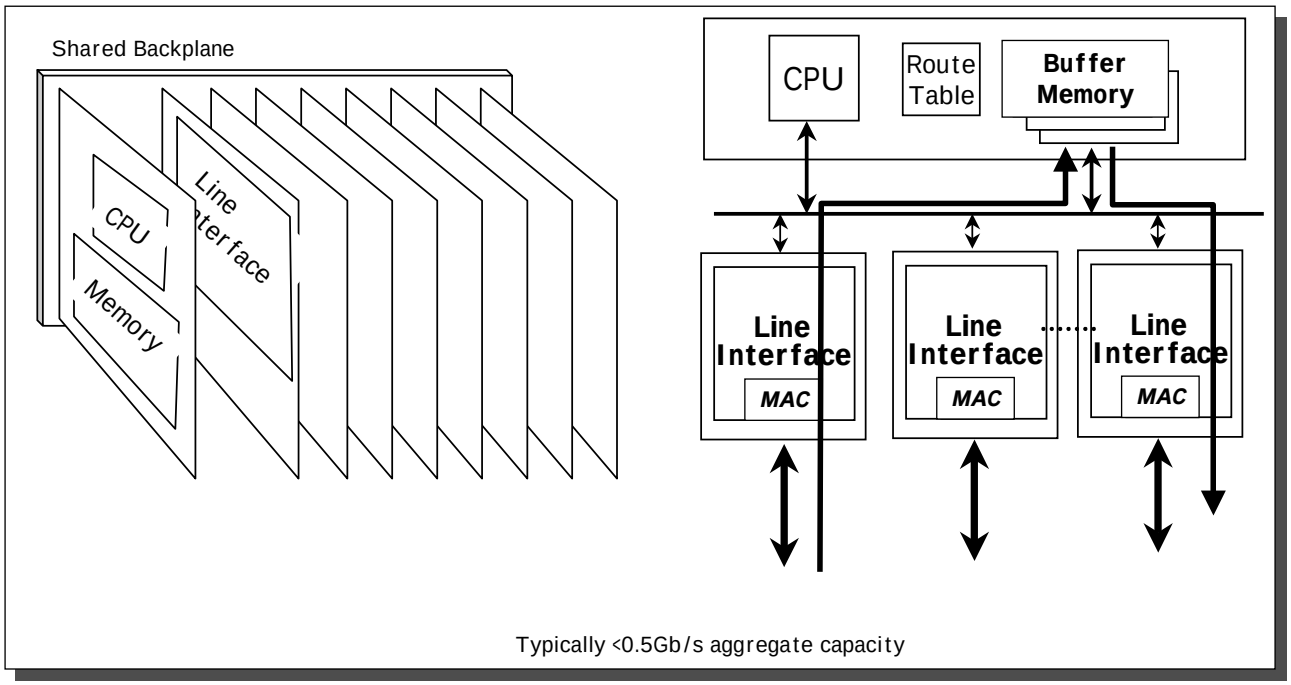
Router de Primeira Geração



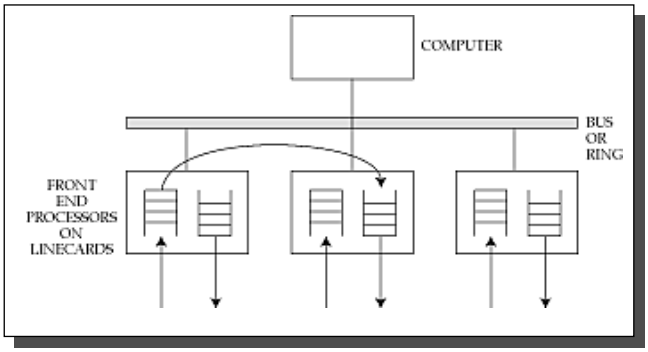


- » Routers (e comutadores Ethernet) de baixo custo
- » Bottleneck
  - – CPU, barramento
  - – Software →
    - processamento normal de pacotes é interrompido com chegada de novos pacotes
    - Mau comportamento em cargas elevadas → latência grande, débito baixa

Router de Primeira Geração

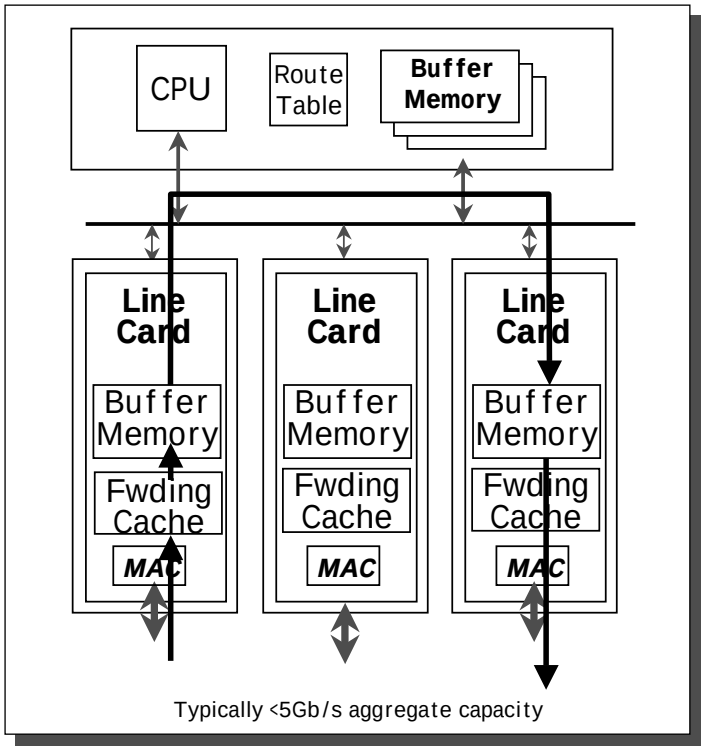


Router de Segunda Geração



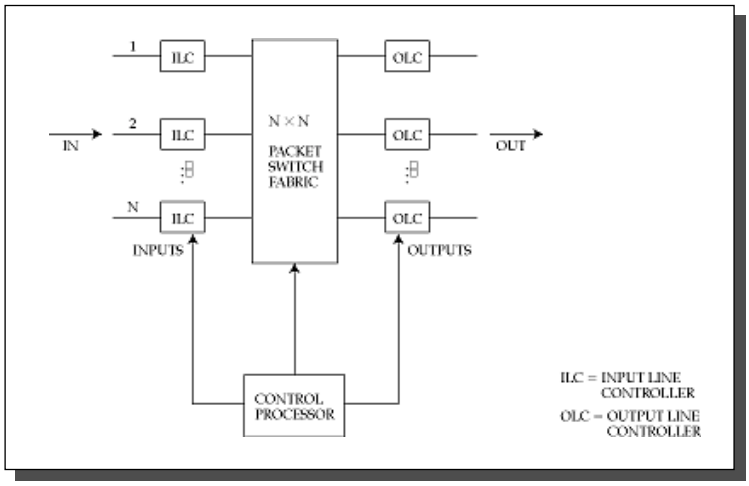
» Cartas inteligentes ➔ encaminham directamente

Router de Segunda Geração

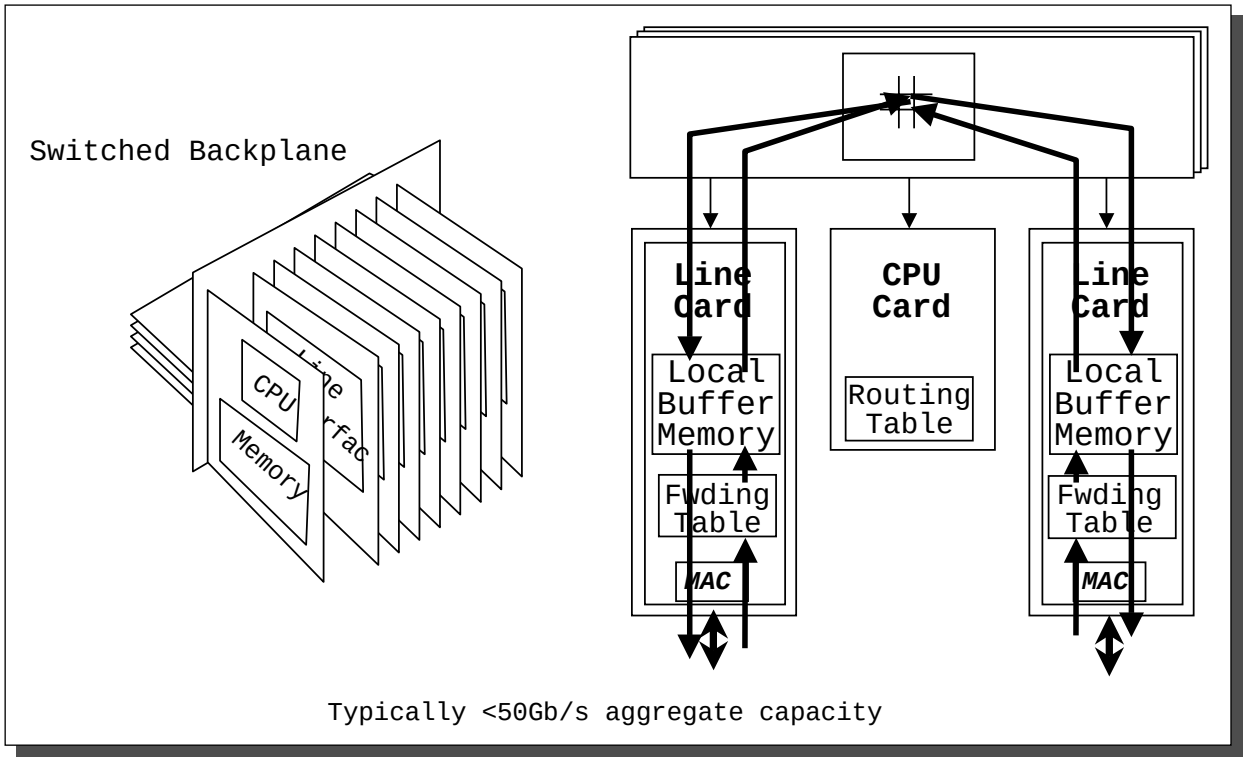


Router de Terceira Geração

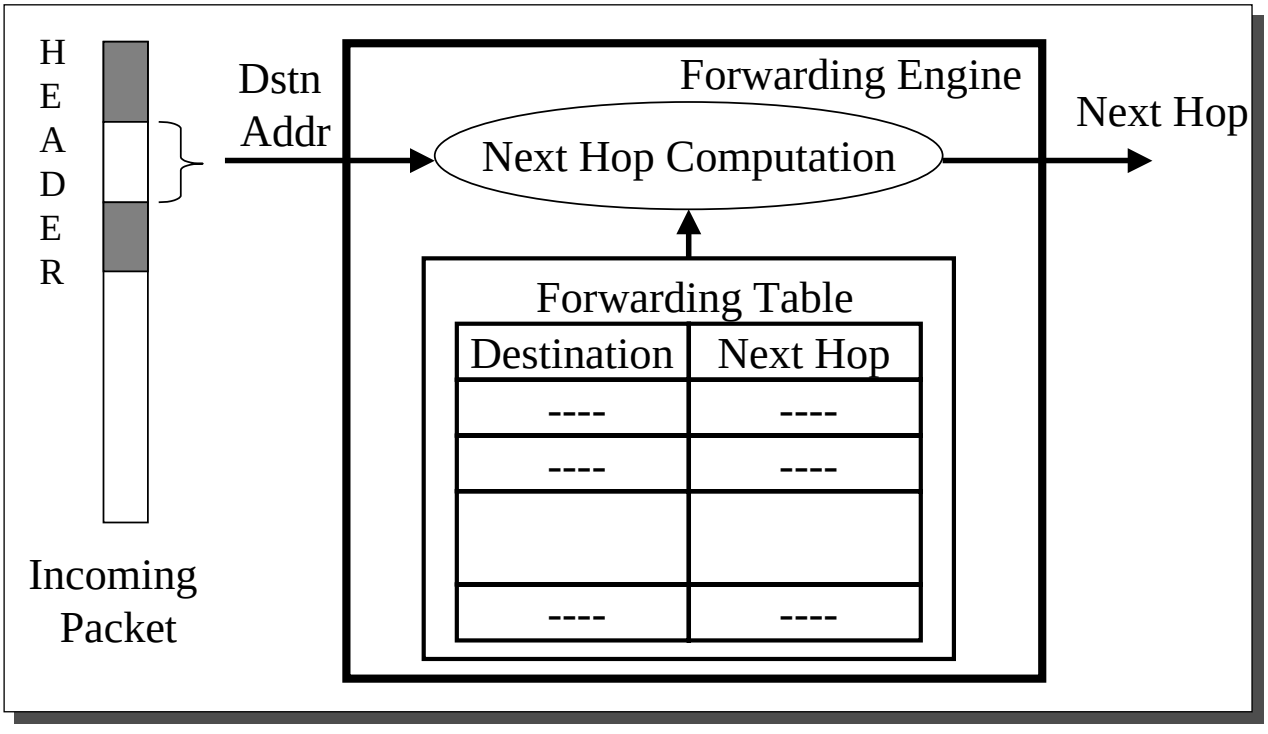
» Equipado com matriz → trajectos paralelos



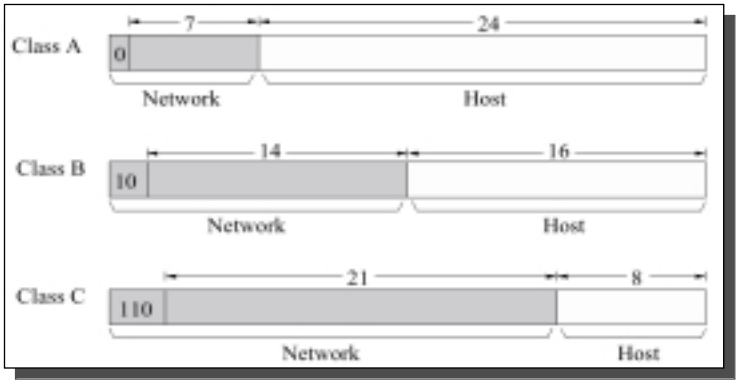
Router de Terceira Geração

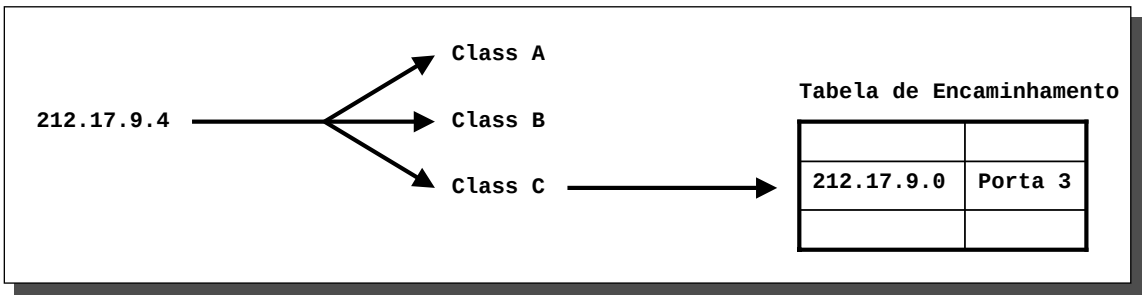


Encaminhamento de um Pacote

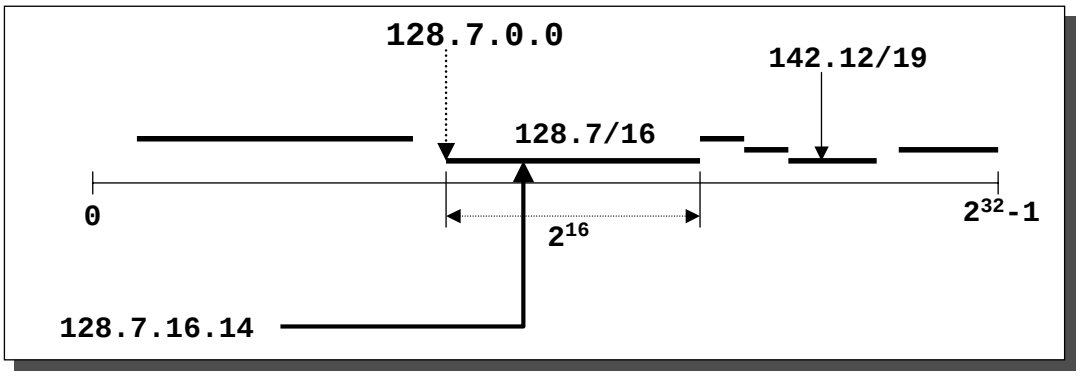


Endereços Baseados em Classes





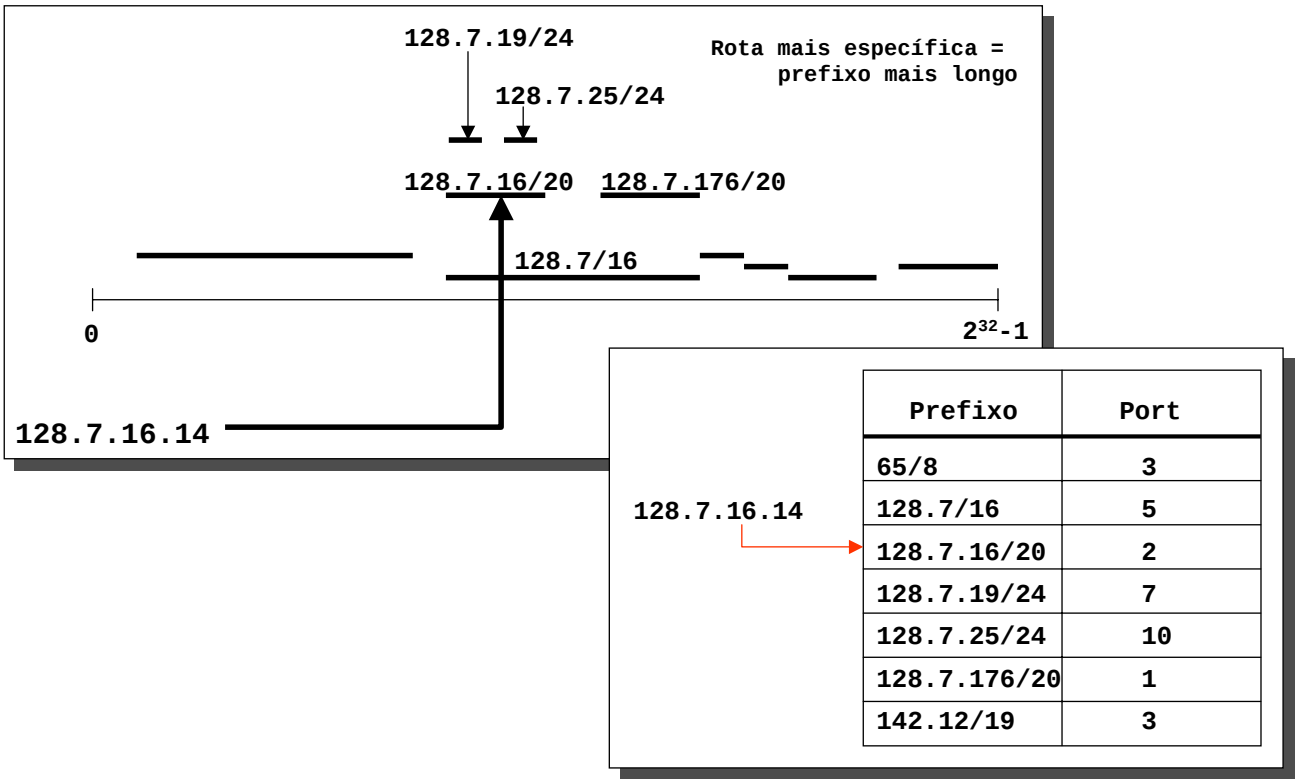
CDIR – Classless Inter-Domain Routing



Inspecção da Tabela de Encaminhamento – A função

- Na recepção de um pacote
  - Porta de entrada inspecciona endereço destino do pacote
  - Tabela de encaminhamento no formato
    - `<networkAddress/mask, port>`
- Se recebido pacote com endereço A, porta de entrada (conceptualmente)
  - Para cada entrada da tabela encaminhamento
    - `val= A & mask*` (ex., mask=8, mask*=255.0.0.0)
    - Se (`val == networkAddress` & mask*)
      - adiciona porta ao conjunto de portas de saída candidatas
  - Escolhe porta correspondente à maior máscara → rota mais específica
  - Ex.
    - `tabEnc={<128.32.1.5/16,1>, <128.32.225.0/18,3>, <128.0.0.0/8,5>}`
    - Pacote com destino `A=128.32.195.1`
    - Conjunto de portas de saída candidatas → `{1,3,5}.`
    - Porta seleccionada → `3` (maior máscara)

CDIR - Classless Inter-Domain Routing



Inspecção da Tabela de Encaminhamento – O Problema

» Encontrar na tabela de encaminhamento o prefixo mais longo

» Tempo de procura

– depende do número e tempos de acesso à memória

- Ex. Algoritmo de procura → 8 acesso à memória
- t_{acMem} = 60 ns, $t_{procura}$ = 480 ns → 2 *10^6 endereços/s
- t_{acMem} = 10 ns, $t_{procura}$ = 80 ns → 12.5 *10^6 endereços/s

Linha	Débito	Núm Pacotes Comp=40 byte	Núm Pacotes Comp=240 byte
E1	2 Mbit/s	6 kpac/s	1 kpac/s
OC3	155 Mbit/s	480 kpac/s	80 kpac/s
OC12	622 Mbit/s	2 Mpac/s	323 kpac/s
OC48	2.5 Gbit/s	8 Mpac/s	1.3 Mpac/s
OC192	10 Gbit/s	31 Mpac/s	5 Mpac/s

Técnica de Procura Clássica

» Entradas armazenadas em forma de árvore

– Cada percurso, da raíz à folha → 1 entrada na tabela

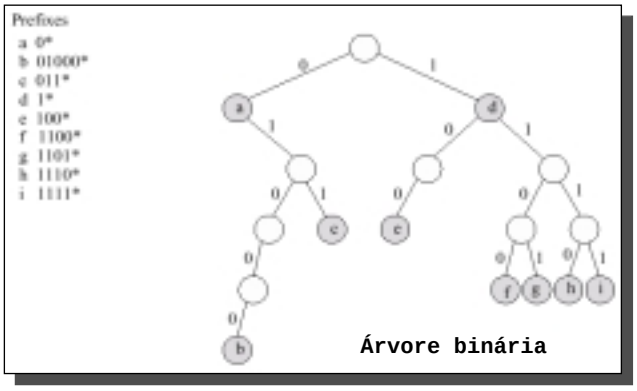
– Prefixo mais longo == percurso mais longo que satisfaz endereço destino pacote

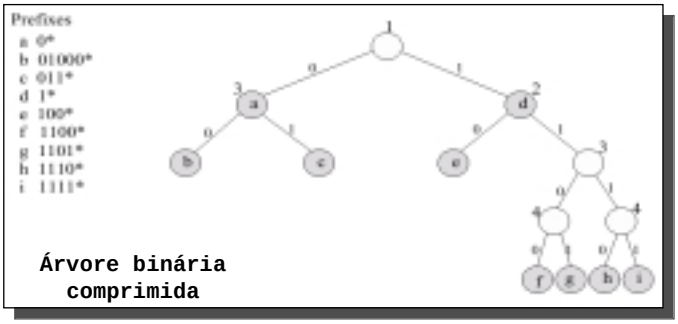
– Usado nas implementações UNIX BSD

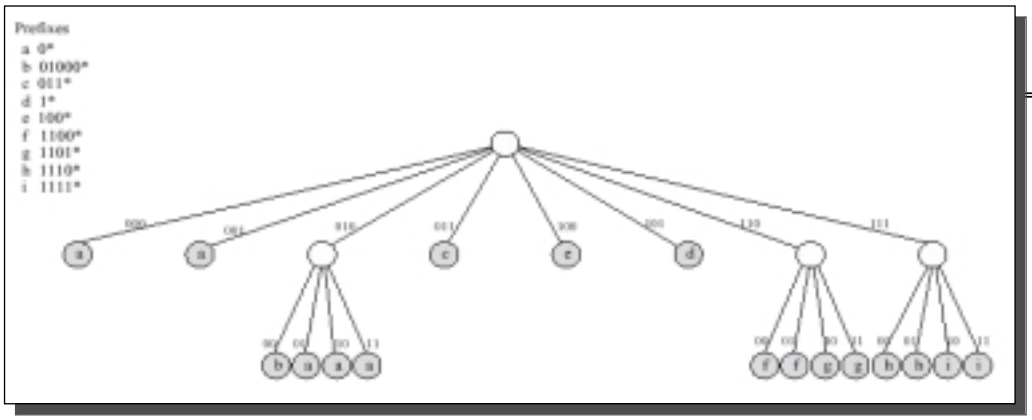
» Caracteríticas

– Minimização de espaço de memória usada. Necessário navegar na árvore

– Preço memória baixa → aproximação errada para os routers rápidos

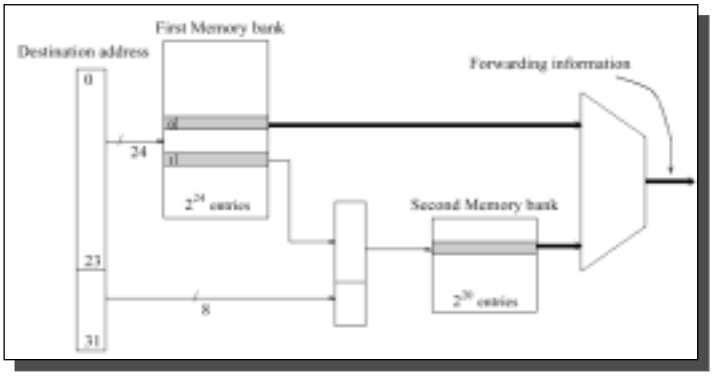






Desempenho melhorado por

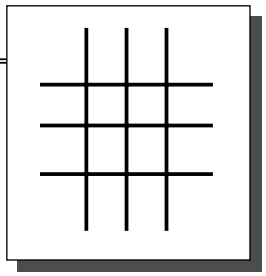
- Técnicas de hardware
- Tabelas de hash
- Compactação de tabelas



Matrizes de Comutação

- Década de 80
  - Descoberta dos conceitos de comutação de pacotes mais comuns (redes de Banyan)
  - Não usados → débitos dos barramentos suficientes
- Década de 90
  - » Aplicação dos conceitos à construção de matrizes de células ATM
    - Pacotes pequenos. Identificador de circuito virtual
- Actualmente, routers usam técnicas de comutação semelhantes ao ATM
  - » Circuitos virtuais permanentes estabelecidos entre portas de entrada e saída
  - » Na porta de entrada, depois de determinada porta de saída
    - Pacote fragementado em células
    - Células comutadas e reassembladas na porta de saída. Antes da transmissão como pacote
  - » Vantagens da solução
    - Suporte QoS simplificado
    - Problemas de comutação de pacotes de comprimento variável evitado
  - » Dificuldades de implementação de
    - multicast
    - algoritmos de controlo de tráfego IP ← orientados a pacotes

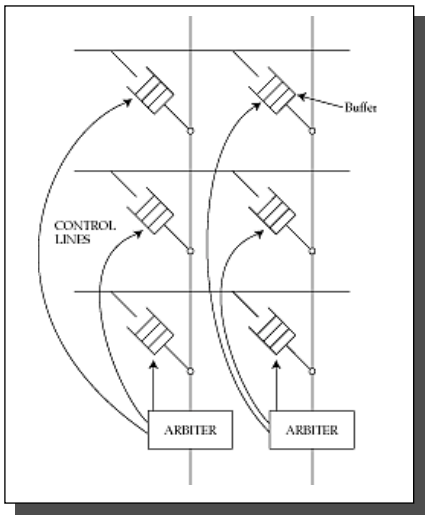
Matriz de Comutação



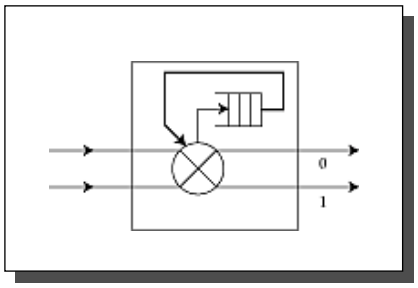
» Modelo simplificado → 2N barramentos em paralelo

» Na comutação de pacotes
  – Ponto de contacto aberto o tempo suficiente para transferir pacote da entrada para a saída

» Pode ser conter buffers internos



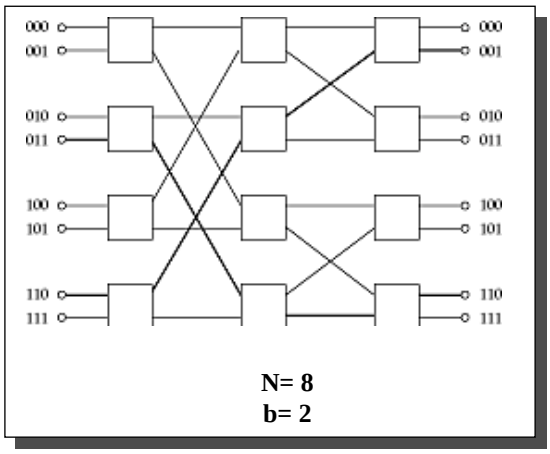
Matriz Elementar



- Encaminhamento
  - » Se 0 → pacote enviado pela linha superior
  - » Se 1 → pacote enviado pela linha inferior
- Se 2 pacotes para mesma saída
  - » Buferiza ou elimina pacote

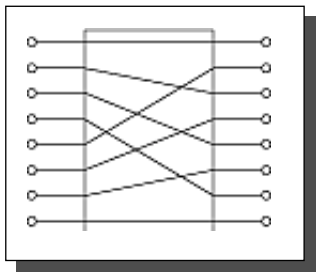
Matriz Banyan

- Matriz *NxN* composta elementos *bxb*
  - » $\lceil \log_b N \rceil$ andares
  - » $\lceil N/b \rceil$ elementos por andar
- Matriz
  - Encaminhamento automático
  - Síncrona ou assíncrona
  - Regular → implementação fácil em VLSI
- Em qualquer porta de entrada
  - Pacote com endereço x é entregue na saída x !
- Se dois pacotes endereçados para x
  - Situação de bloqueio



Matriz não Bloqueante

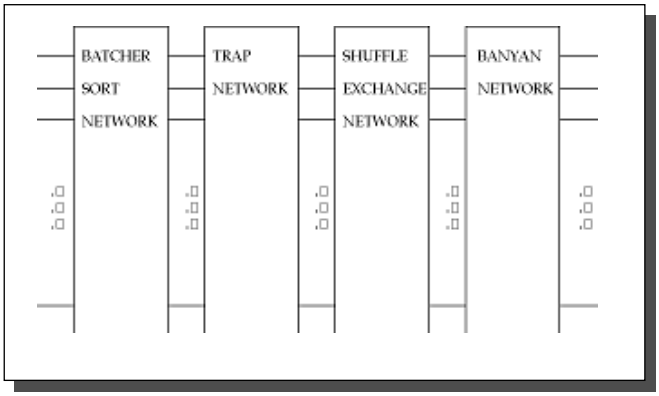
- Bloqueio pode ser evitado → escolha da ordem de apresentação
- Para isso
  - » Ordenar pacotes
  - » Remover duplicados
  - » Remover linhas vazias
  - » Baralhar entradas



- Exemplo

```
[X,   011, 010, X, 011, X, X, X]   - (ordenar)→
[010, 011, 011, X, X,   X, X, X]   - (remover duplicados)→
[010, 011, X,   X, X,   X, X, X]   - (baralhar)→
[010, X,   011, X, X,   X, X, X]
```

Batcher - Banyan



Filas de Saída – Como Melhorar a Velocidade

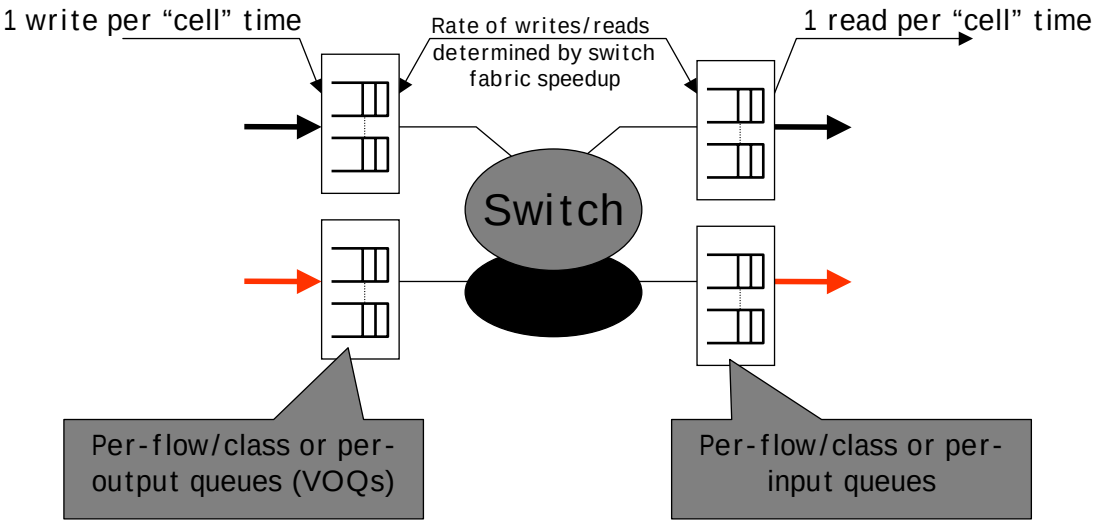
- Problema das filas de saída → tempo de acesso às filas
- 2 técnicas para resolver o problema
  - » Construção de memórias da largura de uma célula
    - – Memórias em paralelo, alimentadas por barramento dados da largura da célula
    - – Escrita num ciclo de memória

      (Preço da memória continua a descer 60% ao ano)
  - » Integração dos buffers + controlador da porta num único chip

Comutador com Fila à Entrada

- Problema das filas à entrada ➔ bloqueio do primeiro pacote
  - » Se primeiro pacote está bloqueado (porta de saída ocupada) ➔
    - – Pacotes seguintes da fila não podem ser enviados (mesmo que suas portas estejam livres)
- Solução → manter em cada entrada uma fila para cada saída
- Outros problemas
  - » Escalonamento de pacotes para suporte de QoS → feito sobre fila de saída
    - – Adaptação não trivial
    - – Escalonamento depende → tipo do pacote, tipo de nível 2 da linha de saída
  - » Controlo de congestão (ex. Random Early Discard)
    - – Actua directamente sobre fila de saída
- Routers de empresa → variedade de portas de saída e políticas
  - » Convivem difícilmente com filas à entrada
  - » Utilizam soluções hibridas

VOQ – Virtual Output Queues



Escalonamento de Pacotes

- Quando vários pacotes → mesma porta de saída
  - » Porta saída buferiza pacotes ← para evitar perdas
  - » Porta serve um pacote de cada vez. Envia-o para link saída
- Disciplina normal de serviço → FCFS (First Come First Served)
  - » Implementaçao simples mas
    - – Não permite dar prioridade a pacotes
    - – Não penaliza as fontes mal comportadas (não reduzem o seu fluxo)
- Método alternativo → Fair Queueing
  - » Fonte k (porta de entrada/fluxo) → atribuído peso p_k
  - » Largura de banda associada à fonte k → $Rp_k / \sum p_i$
  - » Pacotes servidos por ordem diferente da chegada
- Propriedades do Fair Queueing
  - » Protege fontes bem comportada contra incorrecções de outras fontes
  - » Garante largura de banda à fonte. Definição de políticas de admissão
  - » Se fonte bem comportada (regulada por um leaky bucket)
    - → garantia de atraso máximo na transferência dos pacotes

Problemas por Resolver - Identificação de Fluxos

- Fluxo
  - » Conjunto de pacotes com endereços comuns num intervalo de tempo
  - » Pode resultar
    - – De uma ligação TCP longa. Do UDP → sessão áudio ou vídeo
  - » Necessidade de identificar fluxos em tempo real (não há de chamadas)
- Técnica mais usada (ex. MPOA) → Fluxo identificado quando observados
  - » X pacotes com mesmos endereços IP e portas TCP durante últimos Y s
- Fluxos associados a garantias de transporte (débitos, atraso máximo)
- Classificação feita para cada pacote
  - » Classificação de 104 bits (32+32+16+16+8) por pacote
  - » Necessidade de algoritmos de rápidos
  - » Algoritmos de classificação de endereços de 32 bits não podem ser adaptados!