
Comutação

- **Comutadores de circuitos**
 - Princípios básicos
 - Matrizes de comutação
 - Comutadores analógicos
 - Comutadores digitais
- **Comutadores de pacotes**
 - Princípios básicos
 - Matrizes de comutação

Sistemas de Telecomunicações

Mário Jorge Leitão

Este capítulo aborda os aspectos fundamentais da comutação na Rede Fixa de Telecomunicações, nomeadamente em redes de comutação de circuitos e em redes de comutação de pacotes.

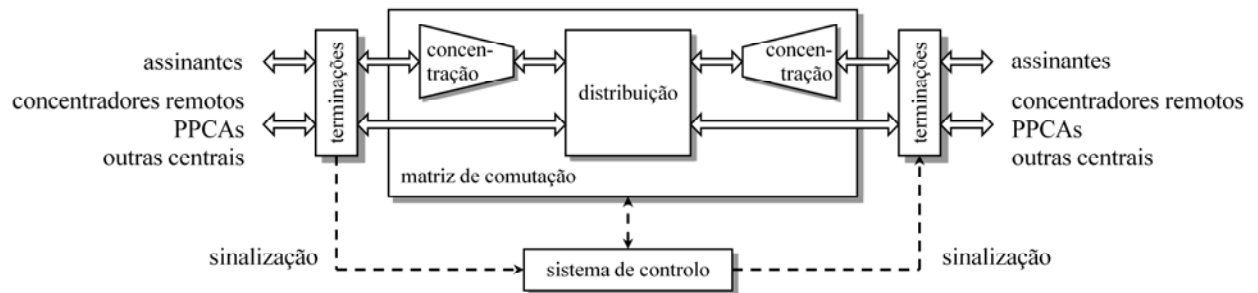
Estudam-se, em especial, matrizes de comutação de circuitos utilizadas em centrais analógicas e digitais, e matrizes de comutação de pacotes, que recorrem a matrizes elementares de comutação de unidades de comprimento fixo, que designaremos de células (tal como em ATM).

Comutadores de circuitos

Princípios básicos

Constituição de um comutador de circuitos (central de comutação)

- matriz de comutação interligação de entradas e saídas
- terminações de linha conversão entre sinais externos e o formato de comutação
 - terminação de assinante (só em centrais locais)
 - terminação de ligações entre centrais (junções ou troncas)
- sistema de controlo processamento das chamadas e gestão do comutador



Arquitectura funcional de um comutador de circuitos

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

As centrais de comutação local e de trânsito têm diferenças fundamentais ao nível da arquitectura:

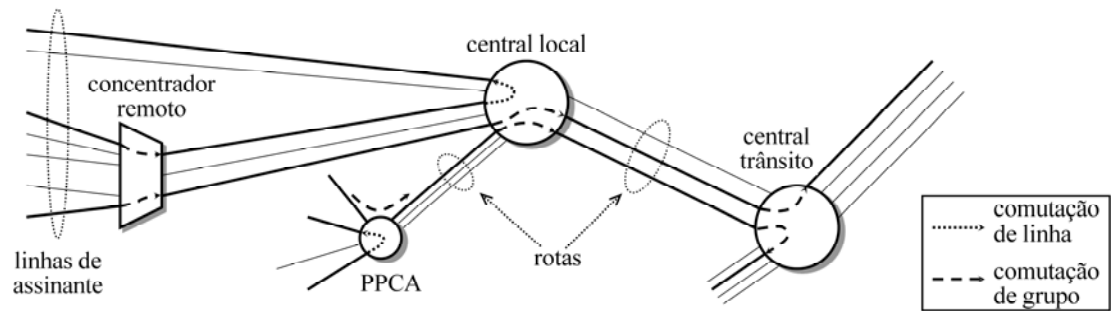
- nas centrais de trânsito não existem terminações de assinante nem andares de concentração - nas ligações provenientes de outras centrais, o tráfego já chega concentrado, com ocupações típicas de 60-70%, na hora mais carregada, pelo que pode ser comutado directamente nos andares de distribuição;
- nas centrais locais há terminações de assinante e andares de concentração, uma vez que o tráfego de assinante é relativamente baixo - a ocupação é, tipicamente, de 10% para o serviço telefónico; após a concentração, a ocupação é equivalente à das ligações provenientes de outras centrais, acedendo então ao andar de distribuição.

Comutadores de circuitos

Princípios básicos

Tipos de comutação

- comutação de linha (ou local)
 - aplicável à interligação de linhas de assinante
 - requer a capacidade de comutar para um canal (linha) específico de saída
- comutação de grupo (de trânsito ou de rota)
 - aplicável ao encaminhamento de ligações através da rede
 - requer a capacidade de comutar para qualquer canal de uma rota de saída



Comutação de linha e comutação de grupo numa rede de comutação de circuitos

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Na comutação de linha, um canal de entrada é comutado para um canal de saída específico, correspondente ao assinante chamado.

Na comutação de grupo, é apenas necessário encaminhar a ligação para o nó seguinte, pelo que a comutação pode ser feita de uma linha de assinante ou de um canal de um grupo (rota) de entrada para um qualquer canal disponível de um grupo (rota) de saída.

Comutadores de circuitos

Matrizes de comutação

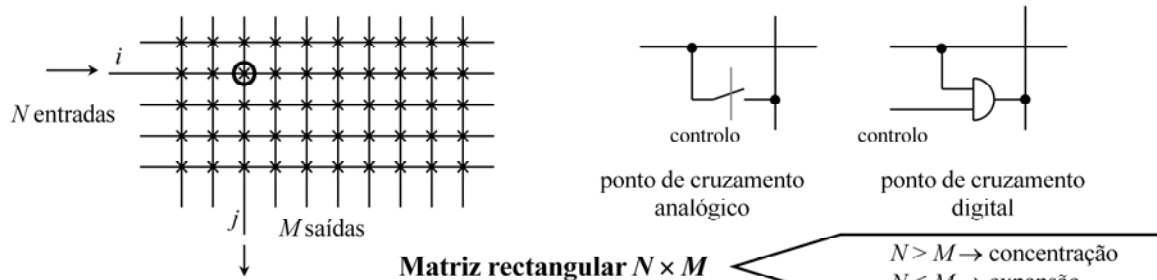
• Comutação de andar único

Princípio de funcionamento

- interliga qualquer entrada a qualquer saída
- actua-se o ponto de cruzamento respectivo

Características

- baixa eficiência → $C=N \times M$ pontos de cruzamento para no máximo N ligações
- impossibilidade de bloqueio
- baixa fiabilidade → impossibilidade de caminhos alternativos



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Conceptualmente, a estrutura de comutação mais simples é um agrupamento rectangular de pontos de cruzamento, os quais permitem interligar todas as entradas a todas as saídas.

As matrizes rectangulares de comutação são usadas em comutadores para suportar tráfego de trânsito, ou como andares de estruturas de andares múltiplos. Poderão promover a concentração de tráfego ($N > M$) ou expansão ($N < M$).

Para suportar a comutação local poderão ser utilizadas matrizes quadradas ($N=M$).

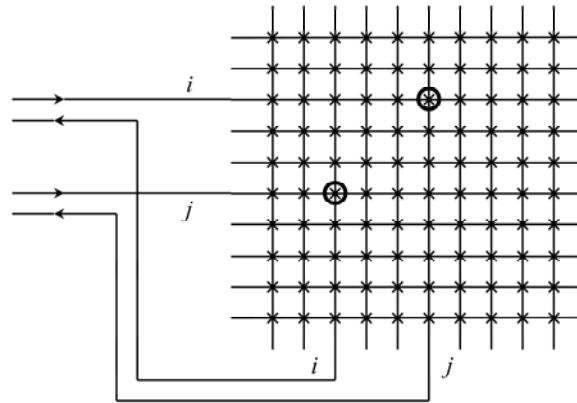
Comutadores de circuitos

Matrizes de comutação

- Comutação de andar único

Comutação a 4 fios

- estabelece-se um percurso em cada sentido
- faz-se a selecção conjugada dos dois sentidos ($i \rightarrow j$ e $j \rightarrow i$)



Matriz quadrada com comutação a 4 fios

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Um única matriz rectangular pode ser usada para estabelecer uma ligação bidireccional num nó de comutação → comutação a 4 fios.

Note-se que os pontos de cruzamento actuados são simétricos em relação a uma das diagonais - este princípio de simetria será usado em estruturas mais complexas, como veremos adiante.

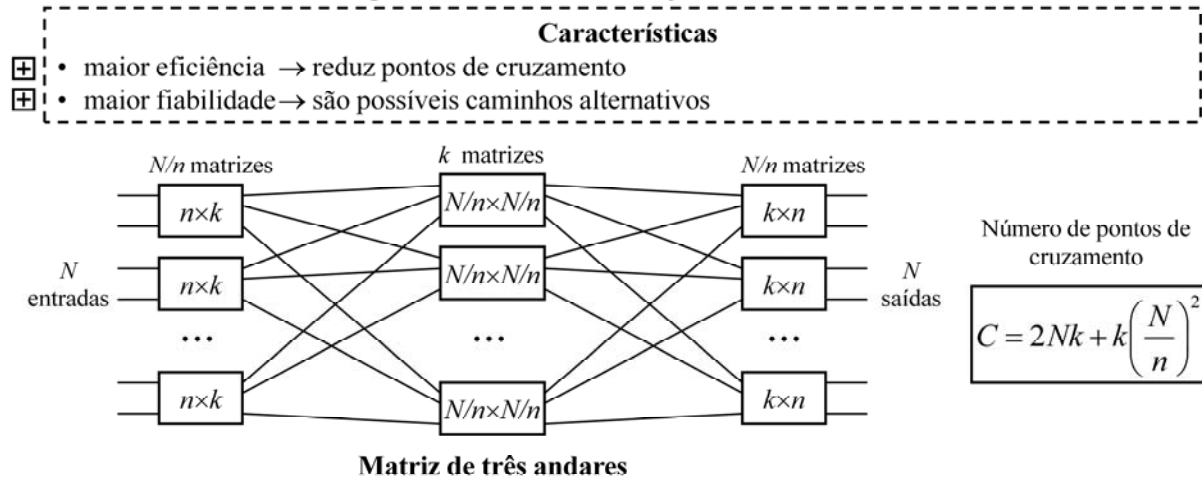
Comutadores de circuitos

Matrizes de comutação

• Comutação de andares múltiplos

Princípio de funcionamento

- andares constituídos por matrizes rectangulares
- cada andar interliga-se com os andares adjacentes



Número de pontos de cruzamento

$$C = 2Nk + k \left(\frac{N}{n} \right)^2$$

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

O número de pontos de cruzamento de uma matriz de um andar cresce rapidamente com o número de entradas e saídas.

No caso de um número elevado de linhas, para evitar um número proibitivo de pontos de cruzamento, recorre-se a estruturas constituídas por andares múltiplos:

- cada andar é constituído por um conjunto de matrizes rectangulares idênticas;
- cada matriz interliga-se a todas as matrizes dos andares adjacentes.

Como veremos a seguir, mesmo no caso de não existir bloqueio, é possível obter um menor número de pontos de cruzamento, em comparação com um único andar. Além disso, se se aceitar uma certa probabilidade de bloqueio, a redução de pontos de cruzamento pode ser muito significativa.

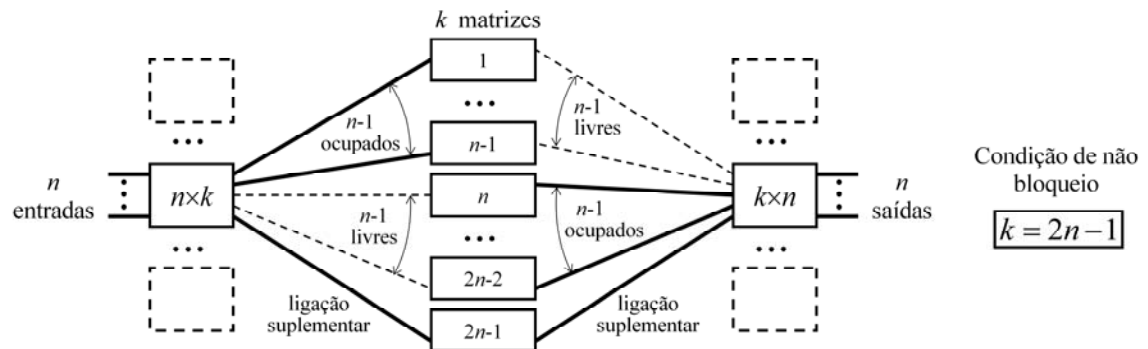
Comutadores de circuitos

Matrizes de comutação

- Comutação de andares múltiplos

Condição de não bloqueio \leftarrow condição de Clos (1953)

- considera a situação mais desfavorável de encaminhamento de uma ligação
- garante incondicionalmente a existência de um caminho para a ligação pretendida



Derivação da condição de não bloqueio

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Considere-se o estabelecimento de uma ligação entre uma linha de uma matriz de entrada e uma linha de uma matriz de saída:

- a situação mais desfavorável de encaminhamento das restantes $n-1$ ligações das matrizes de entrada e de saída ocorre quando há uma disjunção total na ocupação das matrizes intermédias, sendo utilizadas $k = (n-1) + (n-1) = 2n-2$ matrizes intermédias;
- para garantir incondicionalmente a existência de um caminho para a ligação pretendida, terá de se prever uma matriz livre suplementar - logo a condição de não bloqueio virá

$$k = 2n - 1$$

Comutadores de circuitos

Matrizes de comutação

- Comutação de andares múltiplos

Redução do número de pontos de cruzamento

– otimização da condição de Clos

valor ótimo de n
que minimiza C

$$k = 2n - 1 \wedge \frac{\partial C}{\partial n} = 0 \Rightarrow n = \sqrt{N/2}; C_{\min} = 4N(\sqrt{2N} - 1)$$

– introdução de uma certa probabilidade de bloqueio

Número de entradas / saídas (N)	Número de pontos de cruzamento da matriz (C)						
	Matriz simples	Matriz 3 andares sem bloqueio (condição de Clos)			Matriz 3 andares com bloqueio ($B=0,2\%$; $A/N=10\%$)		
		n	k	C	n	k	C
128	16 384	8	15	7 680	8	5	2 560
512	262 144	16	31	63 488	16	7	14 336
2 048	$4,2 \times 10^6$	32	63	$0,52 \times 10^6$	32	10	$0,081 \times 10^6$
8 192	67×10^6	64	127	$4,2 \times 10^6$	64	15	$0,49 \times 10^6$
32 768	$1 074 \times 10^6$	128	255	33×10^6	128	24	$3,1 \times 10^6$

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Como se pode verificar pela tabela, o desenvolvimento de uma matriz simples em 3 andares, mesmo sem bloqueio, permite obter reduções substanciais no número de pontos de cruzamento, redução esta tanto mais significativa quanto maior for o número de entradas / saídas (cerca de 30 vezes, para 32K entradas/saídas).

A opção por andares múltiplos permite, adicionalmente, reduzir o número de andares intermédios, aceitando uma probabilidade de bloqueio controlada. No exemplo da tabela, em que a probabilidade de bloqueio é de 0,2%, para uma ocupação de cada linha de entrada de 10%, o número de pontos de cruzamento reduz cerca de 10 vezes em relação à matriz de 3 andares sem bloqueio, e cerca de 300 vezes, em relação à matriz simples.

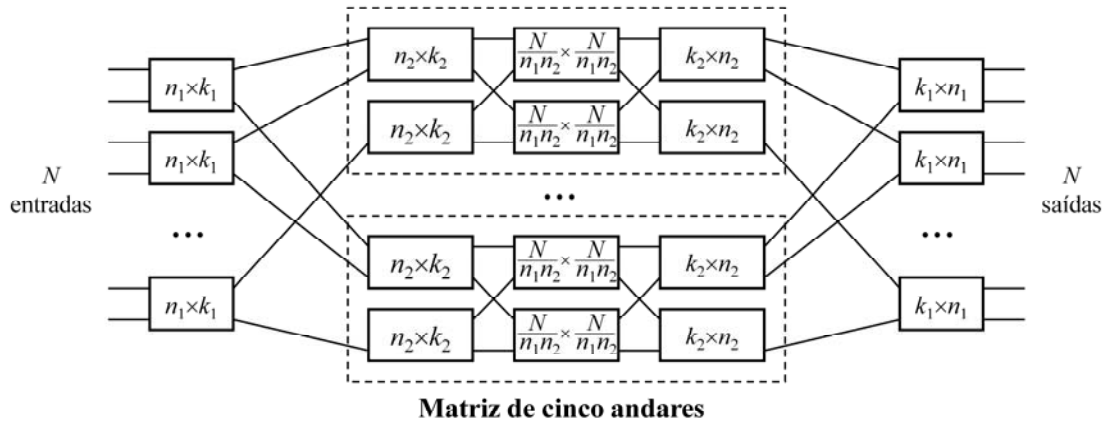
Matrizes de comutação

- Comutação de andar múltiplos

Redução do número de pontos de cruzamento

– aumento do número de andares

- reduz ainda mais o número de pontos de cruzamento
- utilizado nas centrais de maior dimensão



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

A figura mostra um exemplo em que o andar intermédio de uma matriz de 3 andares foi, por sua vez, desenvolvido em 3 andares, resultando um total de 5 andares.

Centrais de muito grande dimensão chegam a ter 8 andares, com uma certa probabilidade de bloqueio, para atingirem números aceitáveis de pontos de cruzamento.

Comutadores de circuitos

Gerações de comutadores

Matriz de comutação		Sistema de controlo
manual - 1878	ligações por fios	humano
electromecânica	selectores rotativos Strowger - 1891	relés e lógica cablada
	selectores de coordenadas Crossbar - 1938	
electrónica	relés miniatura (relés Reed)	computador SPC - 1965 <i>(Stored Program Control)</i>
digital - 1970	sistemas digitais	

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

O que distingue fundamentalmente as diversas gerações de centrais, num percurso de mais de um século, são a tecnologia e arquitecturas utilizadas na matriz de comutação e no sistema de controlo.

Nas redes públicas actuais, todas as centrais de comutação de circuitos são digitais, isto é, recorrem a matrizes de comutação digital e a sistemas de controlo por computador.

Comutadores de circuitos

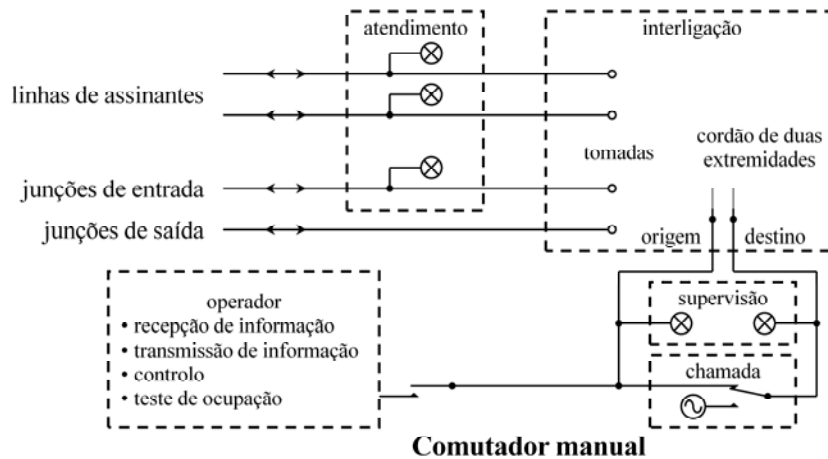
Comutadores analógicos

• Comutador manual

Princípio de funcionamento

funções de sinalização, controlo e comutação manuais

- usadas luzes avisadoras e sinais sonoros para sinalizar estados e pedidos
- comutação efectuada através da ligação de fios → cordões



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Numa central manual, todas as funções de sinalização, controlo e comutação são operadas manualmente.

Comutadores de circuitos

Comutadores analógicos

- Comutador manual



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

A figura mostra um exemplo de uma central pública de comutação manual, que exigia a intervenção de numerosos operadores.

Comutadores de circuitos

Comutadores analógicos

- Comutador Strowger ou passo-a-passo

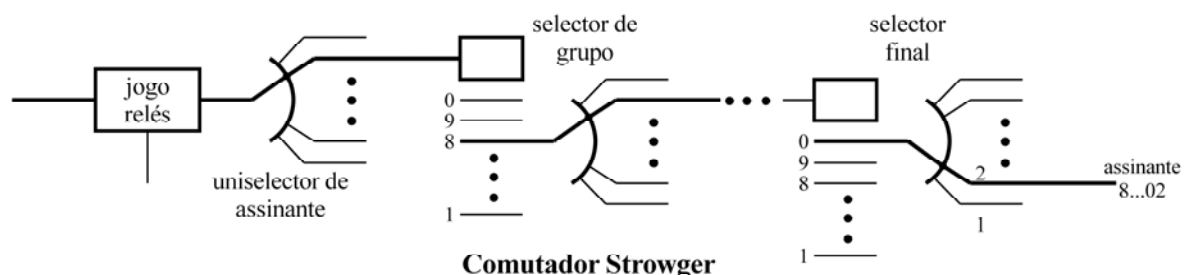
Princípio de funcionamento

tecnologia electromecânica rudimentar

– selectores em cadeia a responder sucessivamente aos dígitos marcados

Características

- grande dimensão física dos equipamentos
- mecânica de precisão com frequente necessidade de manutenção
- consumo de corrente elevada para operar mecanismos de comutação
- tempos de comutação elevados (correspondentes à marcação decádica)
- níveis elevados de ruído nas ligações



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Uma central passo-a-passo é baseada em relés passo-a-passo (selectores).

São usados três tipos de selectores:

- uniselectores (um movimento)
 - conjunto de escovas movendo-se sobre um arco de contactos;
 - efectuam a busca de um primeiro selector livre;
- selectores de grupo (dois movimentos → vertical e horizontal)
 - conjunto de escovas movendo-se sobre 10 arcos sobrepostos com 10 ou mais contactos cada;
 - deslocamento na vertical corresponde a um dígito marcado;
 - deslocamento na horizontal busca um selector livre do andar seguinte;
- selector final
 - deslocamento na vertical corresponde ao penúltimo dígito marcado;
 - deslocamento na horizontal corresponde ao último dígito marcado.

O processo de busca permite introduzir uma certo grau de concentração de modo a aumentar a eficiência, reduzindo o número de pontos de cruzamento, mas cria uma certa probabilidade de bloqueio.

Note-se que os selectores respondem directamente aos sinais de marcação decádica enviados pelo terminal de assinante. Constata-se, assim, que a sinalização decádica, ainda hoje aceite nas interfaces de acesso a sistemas de comutação digital, transporta uma longa herança de mais de um século.

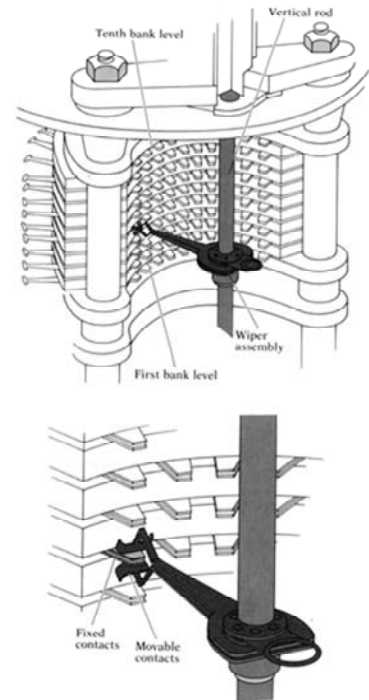
Comutadores de circuitos

Comutadores analógicos

- *Comutador Strowger ou passo-a-passo*



Sistemas de Telecomunicações



Comutação

A figura da esquerda mostra um exemplo de uma central Strowger e as da direita ilustram o funcionamento dos respectivos selectores de dois movimentos.

Comutadores de circuitos

Comutadores analógicos

- Comutador de coordenadas (crossbar)

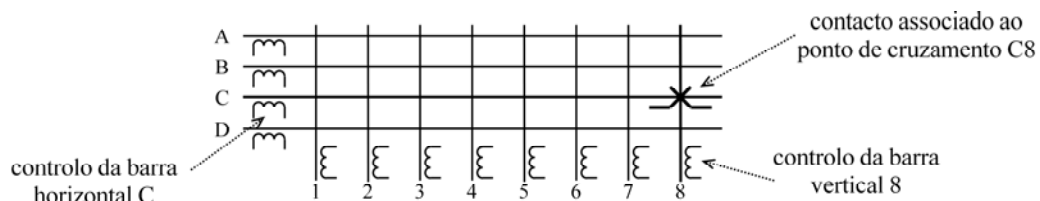
Princípio de funcionamento

evolução tecnológica, mas ainda rudimentar

- matrizes com pontos de cruzamento actuados por relés
- organizadas em etapas de comutação em cadeia → andares múltiplos

Características

- baixas potências
- rapidez de actuação
- baixo ruído (contactos de qualidade, ausência de fricção nos contactos)
- desgaste reduzido (partes móveis sem grandes exigências mecânicas)



Matriz de comutação de coordenadas (crossbar)

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

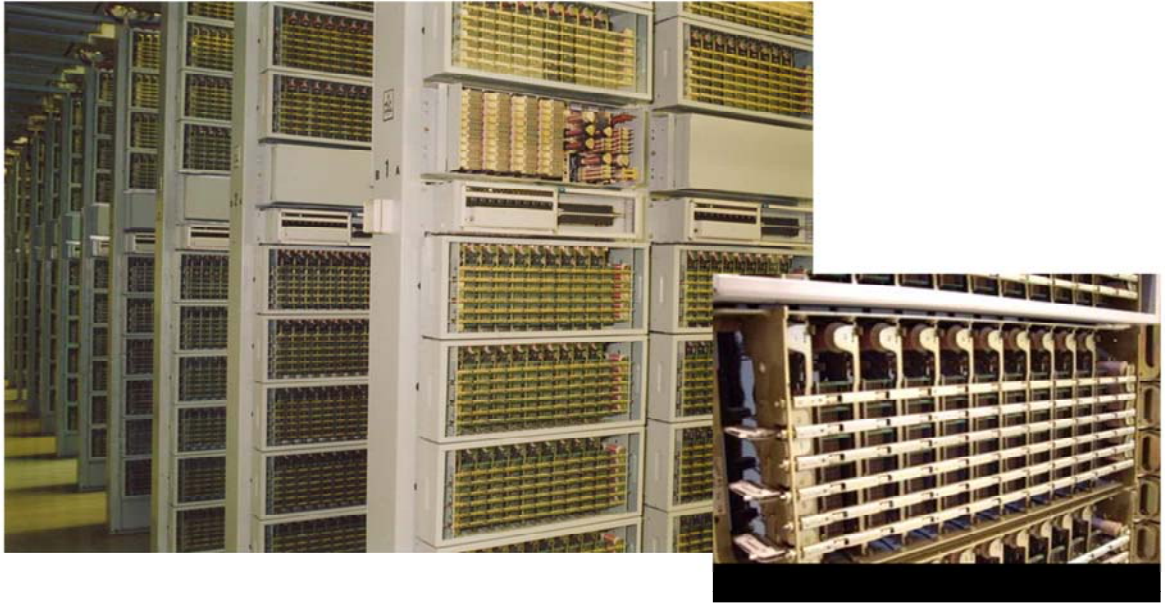
Uma central de coordenadas (*crossbar*) é constituída por matrizes de comutação rectangulares, em que cada contacto eléctrico é efectuado actuando brevemente um relé associado a uma barra horizontal e um outro relé ligado a uma barra vertical.

Uma vez estabelecido o contacto, ficará retido mecânica ou electricamente até ao fim da chamada a que diz respeito, sendo então libertado.

Comutadores de circuitos

Comutadores analógicos

- Comutador de coordenadas (crossbar)



As figuras ilustram uma central de coordenadas e o detalhe das respectivas matrizes de comutação.

Comutadores de circuitos

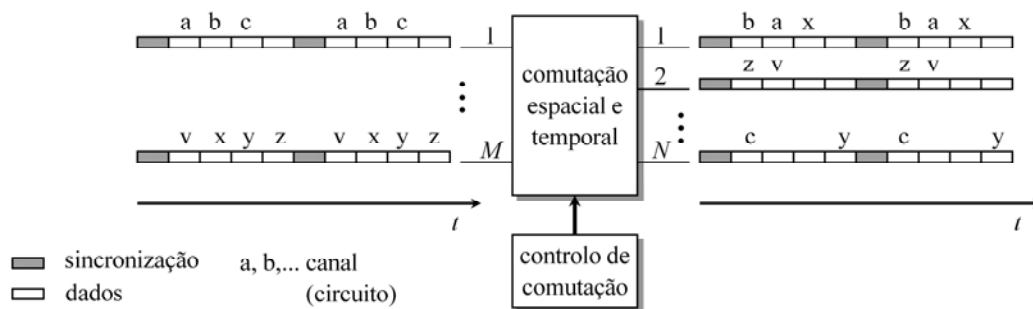
Comutadores digitais

comutação TDM

• Matrizes de comutação digital

Princípio de funcionamento

- as entradas e saídas são ligações multiplexadas TDM (E1 ou múltiplos de E1)
- a comutação consiste na troca de intervalos de tempo (espacial e temporal)
- exige que todas as entradas estejam sincronizadas entre si



Matriz de comutação de circuitos digital

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

A comutação digital é um processo de interligar intervalos de tempo entre um conjunto de ligações multiplexadas no tempo (TDM), suportadas, em geral, em estruturas de 32 intervalos de tempo a 2 048 kbit/s (ligações E1), ou múltiplos destas ($n \times 2$ Mbit/s, $n=2, 4$, tipicamente)

A comutação digital assenta em duas técnicas complementares:

- na comutação espacial, transfere-se a informação entre linhas de entrada e linhas de saída, do mesmo intervalo de tempo;
- na comutação temporal, transfere-se a informação entre intervalos de tempo.

As matrizes de comutação digital podem ser realizadas com um único andar, ou, no caso de sistemas de maior dimensão, recorrendo a vários andares.

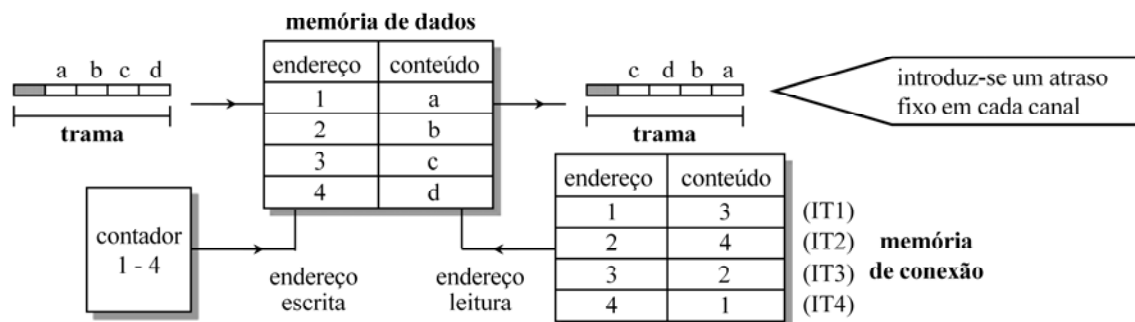
Comutadores de circuitos

Comutadores digitais

• Matrizes de comutação digital

Matrizes de comutação temporal

- utiliza-se uma **memória de dados**, onde a informação de cada trama é escrita sequencialmente e lida com a ordem pretendida (ou vice-versa)
- processo de leitura (ou escrita) é controlado por uma **memória de conexão**



Matriz de comutação digital temporal

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

No exemplo da figura, para transferir do intervalo 1 para o 4 foi necessário atrasar 3 intervalos de tempo. O atraso mínimo é um intervalo e o máximo é a duração de uma trama completa.

Se a trama tiver k intervalos de tempo, a dimensão da memória de conexão deverá ser de k posições com $\log_2 N$ bits (N é geralmente uma potência de 2). Assim, o conteúdo de cada posição da memória de conexão indica qual o endereço da posição que será lida na memória de dados, no respectivo intervalo de tempo.

Analise-se como opera a matriz da figura: o canal **b** está no intervalo de tempo 2 de entrada e é escrito na posição 2 da memória de dados; é então lido no intervalo de tempo 3 de saída, uma vez que a memória de conexão tem conteúdo 2 na posição 3 (accede à posição 2 da memória de dados no intervalo de tempo 3). Desta forma há uma efectiva transferência temporal do canal **b**, do intervalo de tempo 2 de entrada para o intervalo de tempo 3 de saída.

Em vez da escrita sequencial e leitura controlada, a memória de dados pode ser lida sequencialmente e escrita de forma controlada pela memória de conexão.

No período correspondente a uma trama (125 μ s no sistema E1), a escrita e leitura de intervalos de tempo pode (e deve) ser feita de forma intercalada, numa sequência do tipo: escrita do intervalo de tempo de entrada 1, leitura do intervalo de tempo de saída 1, escrita do intervalo de tempo de entrada 2, leitura do intervalo de tempo de saída 2, e assim sucessivamente até ao último intervalo de tempo da trama, repetindo-se o ciclo indefinidamente.

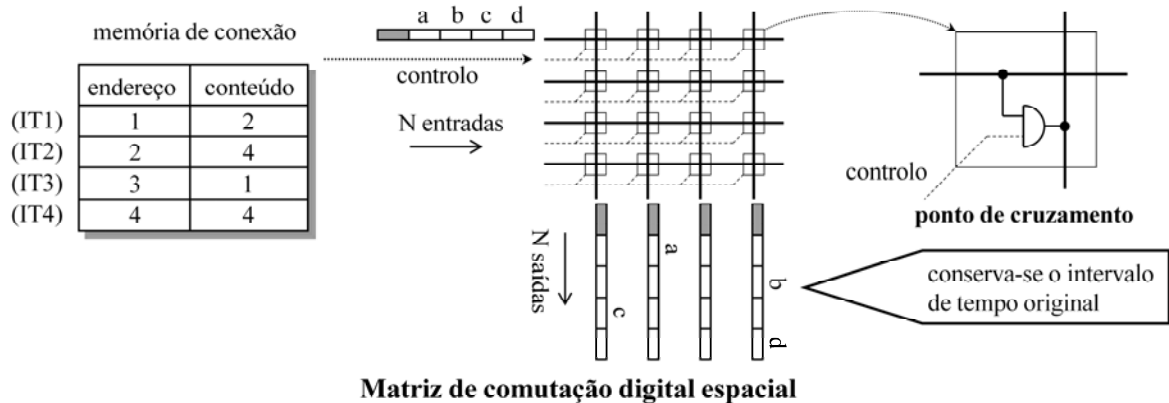
Comutadores de circuitos

Comutadores digitais

• Matrizes de comutação digital

Matrizes de comutação espacial

- baseadas em barramentos com pontos de cruzamento nos nós
- actua-se cada ponto de cruzamento durante o respectivo intervalo de tempo
- processo é controlado por **memórias de conexão** (uma por linha ou por coluna)



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Cada ponto de cruzamento pode ser utilizado para efectuar uma dada interligação em cada intervalo de tempo. Ou seja, se os sinais TDM de entrada tiverem k intervalos de tempo em cada trama, a matriz de comutação digital espacial terá k estados de comutação. Esta operação por divisão nos tempos conduz a que a capacidade de comutação seja equivalente a k matrizes convencionais independentes.

Para gerar os sinais de controlo, poderão ser utilizadas N **memórias de conexão**, controlando cada uma delas os pontos de cruzamento de uma dada linha (o controlo por colunas também é possível). A dimensão de cada uma destas memórias deverá ser de k posições com $\log_2 N$ bits (N é geralmente uma potência de 2). Assim, o conteúdo de cada posição da memória de conexão indica qual dos N pontos de cruzamento da linha é actuado no respectivo intervalo de tempo.

Observe-se o exemplo da figura: como se pode verificar, no intervalo de tempo 2 da linha 1 é actuado o ponto de cruzamento 4. O canal b da linha 1 de entrada é efectivamente transferido para a linha 4 de saída, mantendo o mesmo intervalo de tempo, neste caso o 2.

Comutadores de circuitos

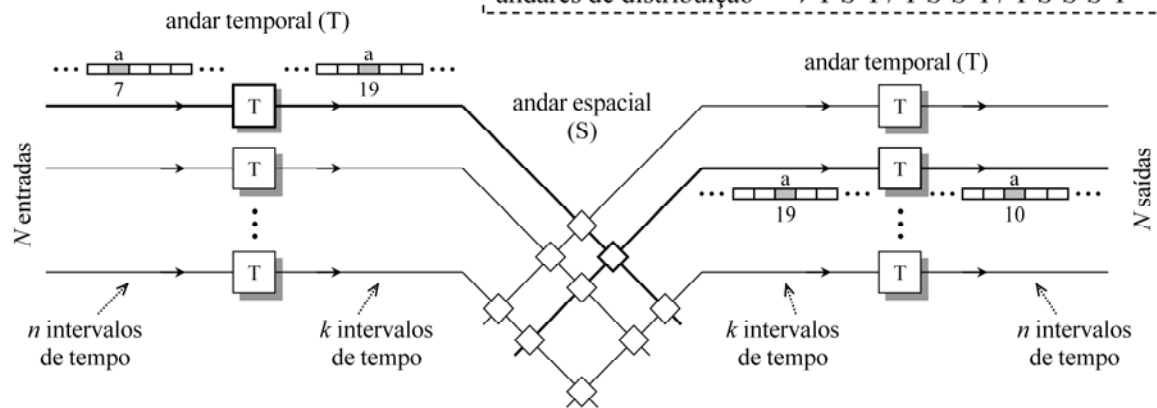
Comutadores digitais

• Matrizes de comutação digital

Matrizes de comutação temporal e espacial

- matrizes de grande capacidade formadas por andares múltiplos de matrizes T e S
- configurações comuns

andares de concentração → T-S
andares de distribuição → T-S-T / T-S-S-T / T-S-S-S-T



Matriz de comutação digital temporal e espacial de três andares (T-S-T)

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Uma matriz de comutação espacial, por si só, não permite interligar qualquer intervalo de entrada a qualquer intervalo de saída, uma vez que só é possível comutar no mesmo intervalo de tempo. Por isso, não se utiliza isoladamente em nenhum comutador.

Uma matriz de comutação temporal, apesar de permitir qualquer comutação sem bloqueio, tem a sua capacidade limitada pela tecnologia das memórias e controlo associado, sendo por isso utilizada apenas em centrais de pequena e média dimensão.

Para ultrapassar estas limitações, é necessário associar matrizes de comutação espacial (S) e temporal (T), normalmente organizadas em três ou mais andares: S-T-S, T-S-T, T-S-S-T, T-S-S-S-T, etc.

As configurações com dois andares, T-S ou S-T, por introduzirem grande probabilidade de bloqueio, não podem ser usadas em comutação de linha, mas apenas em comutação de grupo, ou em andares de concentração.

Note-se, ainda, que as estruturas com andares múltiplos permitem um grande número de caminhos alternativos para interligar um intervalo de tempo de entrada a um intervalo de tempo de saída: por exemplo, na estrutura T-S-T da figura, o canal a no intervalo de tempo 10 da matriz T de entrada pode ser comutado para um intervalo de tempo qualquer, seja o 19, da matriz S intermédia, o qual, por sua vez, será comutado para o intervalo de tempo 10 da matriz T de saída. Assim, os caminhos alternativos são constituídos pelo conjunto dos intervalos de tempo da matriz S intermédia que permitem interligar a matriz T de entrada à matriz T de saída.

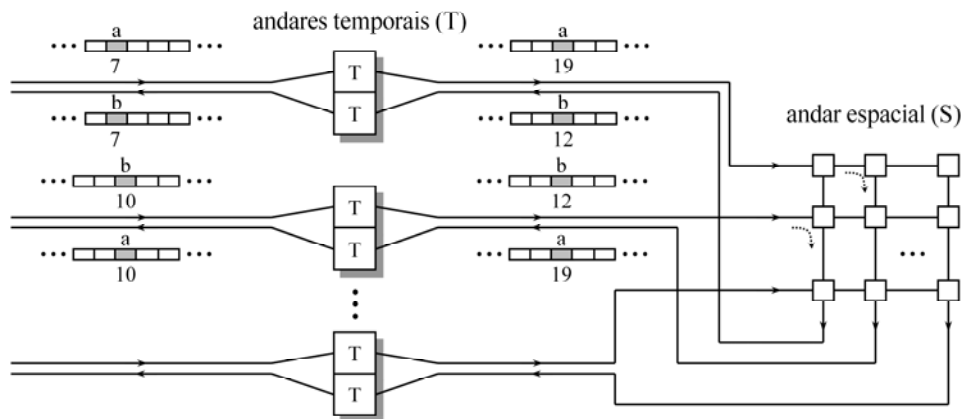
Comutadores de circuitos

Comutadores digitais

- Matrizes de comutação digital

Comutação a 4 fios

- andares temporais rebatidos
- caminhos de ida e retorno simétricos



Matriz de comutação digital temporal e espacial de três andares (T-S-T) com comutação a 4 fios

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Uma vez mais, é utilizado o método de simetria para estabelecer uma ligação bidireccional através de uma matriz de comutação digital. Por exemplo, se cada ligação do andar espacial suportar k intervalos de tempo, ao intervalo x num sentido será associado o intervalo $y=k-x+1$ no sentido inverso. Note-se que, pela mesma regra, ao intervalo y corresponde o intervalo x (na figura, considerou-se $k=32$)

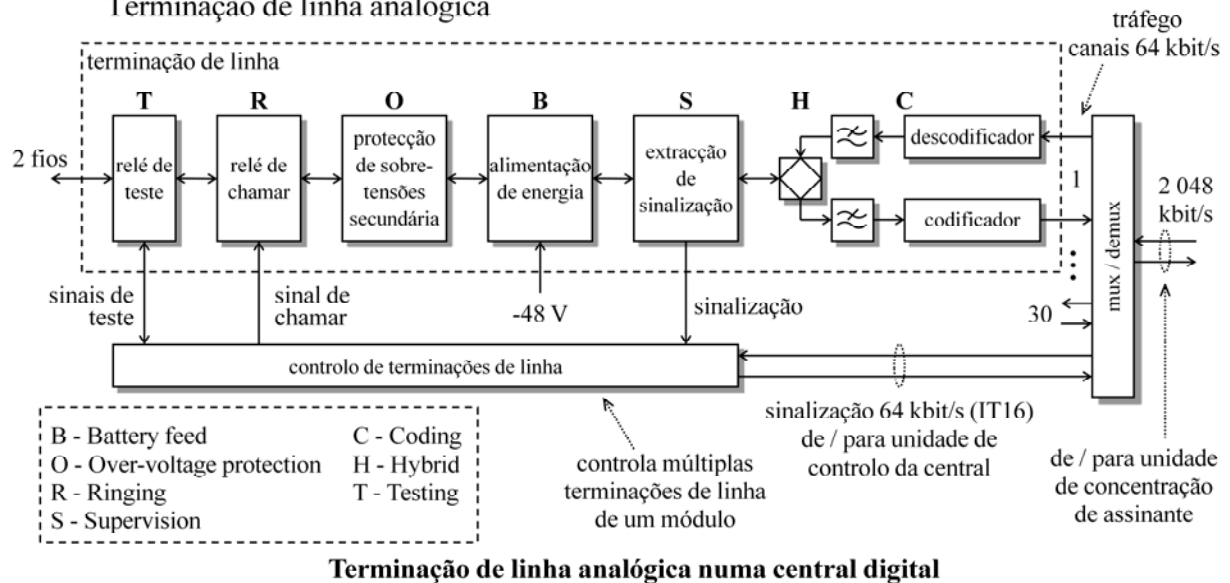
Com vista a assegurar a proximidade física entre a entrada e a saída de cada ligação, os andares temporais periféricos são fisicamente rebatidos, proporcionando uma organização modular mais eficiente, como se pode observar no exemplo da matriz T-S-T da figura.

Comutadores de circuitos

Comutadores digitais

• Terminações de linha

Terminação de linha analógica



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

A terminação de linha de assinante analógico é a componente com maior peso na dimensão e custo de uma central. Inclui funções sumariamente indicadas pelo acrónimo **BORSCHT**:

- B → *Battery feed*
injecção na linha uma corrente de 20 a 120 mA a partir de uma bateria de -48 V DC;
- O → *Over-voltage protection*
inclui protecções sobretudo contra descargas atmosféricas e linhas de energia eléctrica:
 - protecção primária no repartidor - ampolas de gás e fusíveis (de efeito rápido para picos de correntes elevadas e de efeito lento para correntes persistentes ligeiramente acima do máximo);
 - protecção secundária na unidade de terminação - fusíveis e díodos *zener* para absorção de sobre-tensões não eliminadas na protecção primária;
- R → *Ringing*
inclui circuitos para injecção de sinal de tocar (75 V, 200 mA, 25 Hz, 1s ON, 5s OFF) e detecção da resposta do assinante chamado;
- S → *Supervision*
consiste na monitoração do lacete de assinante:
 - detecção da presença de corrente de linha para interpretação das condições de sinalização;
 - no caso de sinalização multifrequência, processamento do sinal para detecção do número;
- C → *Coding*
consiste na codificação/descodificação PCM do sinal de voz:
 - presentemente utilizam-se circuitos integrados para realizar a filtragem (de pré-amostragem e de reconstrução) e a conversão A/D e D/A (*codec*);
 - um único circuito pode efectuar as duas funções combinadas (*combo*);
- H → *Hybrid*
a comutação digital exige a conversão de 2-4 fios através de circuitos híbridos;
- T → *Testing*
um relé na entrada permite redireccionar a linha para um equipamento específico de teste da linha.

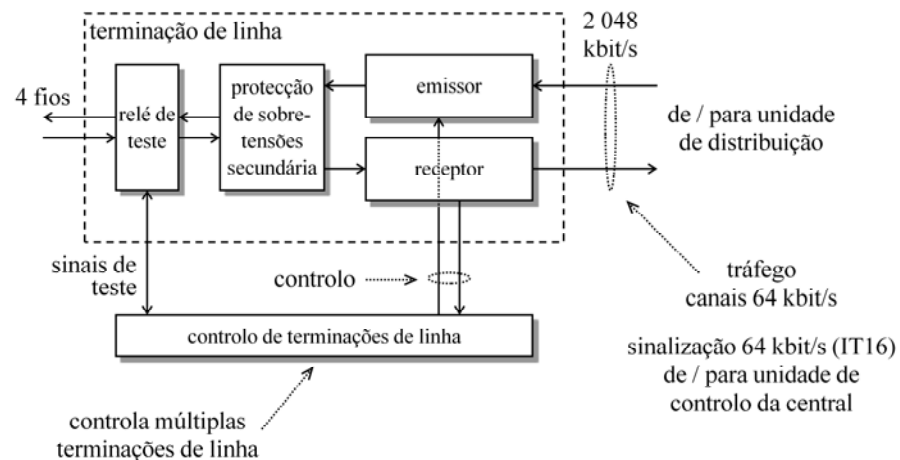
O acesso ao andar de concentração de assinante é assegurado por ligações E1 (2 048 kbit/s), nas quais são multiplexados os canais de 64 kbit/s de cada terminação e a sinalização de múltiplas terminações (no intervalo de tempo 16 - IT16).

Comutadores de circuitos

Comutadores digitais

- Terminações de linha

Terminação de junção digital (ou de acesso de ritmo primário RDIS)



Terminação de junção digital

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Numa interface de junção digital a 2 048 kbit/s ou de acesso de ritmo primário (30B+D), o tráfego já se encontra normalmente concentrado. Por isso, é feito o encaminhamento directamente para a unidade de distribuição da central.

Tal como no caso anterior, a sinalização de canal comum no intervalo de tempo 16 (IT16) é por sua vez direccionada para o receptor/emissor de sinalização por canal comum integrado no sistema de controlo da central.

Comutadores de circuitos

Comutadores digitais

- Sistema de controlo

Funções

- coordenação geral do sistema
- processamento de chamadas
- manutenção
- administração

Requisitos

- tempos de vida útil muito longos (tipicamente 20 anos)
- operação sem interrupções (máximo 1 a 2 horas acumuladas na vida útil)
- controlo em tempo real de um grande número de processos
- calculo aritmético relativamente modesto

consequências: *hardware* e *software* fiáveis e de elevado desempenho

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

As funções de controlo numa central digital incluem nomeadamente:

- coordenação geral do sistema: é assegurada pelas funções típicas do sistema operativo - controlo de temporizações, escalonamento de processos, gestão de interrupções, gestão de memória, controlo de comunicação entre processadores, controlo de I/O, controlo de sobrecarga;
- processamento de chamadas: constitui o objectivo fundamental do controlo e engloba o conjunto de tarefas de maior peso, de tal forma que o desempenho do controlo de uma central se mede habitualmente através do número de tentativas de chamadas que é capaz de processar num dado intervalo de tempo (ex: BHCA, *Busy Hour Call Attempts*);
- manutenção: assegura o tratamento preventivo e correctivo de falhas;
- administração: refere-se a acções de gestão global da central e da sua configuração, nomeadamente em termos das ligações externas a outras centrais e a assinantes (no caso de uma central local).

Os requisitos de elevada fiabilidade do sistema de controlo são assegurados, nomeadamente, através da adopção de técnicas convencionais de redundância.

Comutadores de circuitos

Comutadores digitais



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

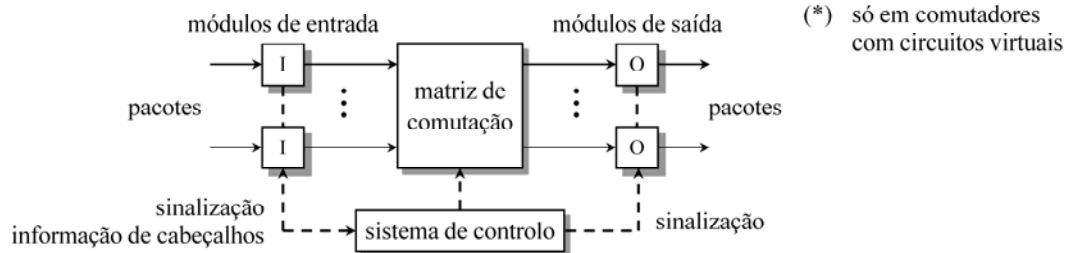
As figuras ilustram uma central de comutação digital e o detalhe das placas que constituem a respectiva matriz de comutação.

Comutadores de pacotes

Princípios básicos

Constituição de um comutador

- matriz de comutação encaminhamento de pacotes da entrada para a saída
- módulos de entrada/saída leitura de cabeçalhos de pacotes
inserção/extracção de etiquetas de encaminhamento
extracção/inserção de pacotes de sinalização (*)
comutação de cabeçalhos à saída (*)
- sistema de controlo processamento das conexões e gestão do comutador



Arquitectura funcional de um comutador

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

A matriz de comutação transfere pacotes de informação de utilizador de uma porta de entrada para uma de saída, para todas as portas de saída (*broadcast*), ou para um sub-conjunto destas (*multicast*).

Os módulos de entrada / saída

- efectuem a leitura de cabeçalhos de pacotes para processamento no sistema de controlo;
- em certas implementações, adicionam à entrada uma etiqueta contendo informação de encaminhamento para uso interno da matriz de comutação, a qual é removida à saída.

Adicionalmente, nos comutadores de pacotes em redes orientadas a circuitos virtuais, os módulos de entrada / saída

- na entrada, entregam as células de sinalização ao sistema de controlo e inversamente, à saída;
- asseguram a comutação de cabeçalhos à entrada ou à saída.

O sistema de controlo

- processa os cabeçalhos no sentido de estabelecer e controlar o encaminhamento dos pacotes na matriz de comutação;
- gere globalmente o comutador;
- é caracterizado por parâmetros de qualidade de serviço como tempo de estabelecimento de chamada e tempo de libertação de chamada.

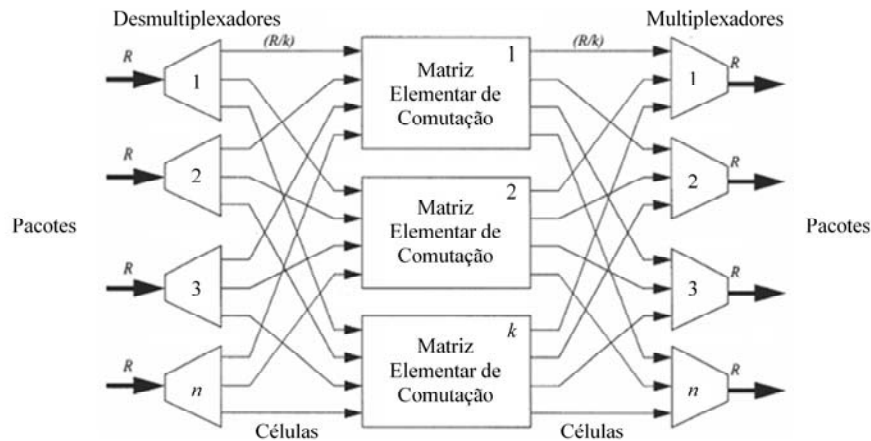
Adicionalmente, nos comutadores de pacotes em redes orientadas a circuitos virtuais, o sistema de controlo controla a admissão de chamadas (CAC) → recebe células de sinalização dos módulos de entrada, interpreta-as, toma decisões de admissão de conexões e de encaminhamento e atribui recursos.

Comutadores de pacotes

Princípios básicos

Operação com matrizes elementares de comutação de células de comprimento fixo

- permite maior simplicidade de comutação a menor velocidade
- exige a utilização de desmultiplexadores e multiplexadores



Comutação de pacotes com matrizes elementares de comutação de células

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

A comutação genérica de pacotes recorre geralmente a soluções idênticas às aplicáveis para ATM, já que os pacotes de comprimento variável podem ser segmentados à entrada em unidades menores da mesma dimensão (equivalentes a células), comutados para a saída e reassemblados de forma a recuperar os pacotes originais.

Como o processo de comutação de cada célula pode introduzir atrasos variáveis, será necessário acrescentar à entrada uma etiqueta que permita à saída obter a ordenação inicial de células para reconstituir adequadamente o pacote.

Note-se ainda que, no exemplo da figura, o problema da comutação de pacotes de elevado débito é reduzido em cada uma das matrizes intermédias, uma vez que operam a um débito k vezes inferior ao débito de entrada, em que k é o número de células que resulta da segmentação do pacote.

Nos módulos de entrada dos comutadores de pacotes, é ainda possível efectuar a conversão série-paralelo à entrada e paralelo-série à saída, de forma a que o comutador opere a uma velocidade 8 vezes menor.

Comutadores de pacotes

Princípios básicos

Comutação de pacotes *versus* comutação digital de circuitos

		Comutação digital de circuitos	Comutação de pacotes
Recursos atribuídos a cada canal		um intervalo de tempo na mesma posição temporal em tramas consecutivas	fluxo variável de pacotes
Parâmetros de QoS	Atraso	constante	variável com a carga
	Perda de informação	impossível	possível perda de pacotes em caso de sobrecarga de filas de espera
	Bloqueio de conexões	ocorre quando não é possível encontrar um caminho livre entre a entrada e a saída	ocorre em comutadores com circuitos virtuais quando não é possível assegurar estatisticamente a QoS para a nova conexão e as conexões existentes
Matriz de comutação	Andar espacial	barramento com encaminhamento estático de intervalos de tempo	barramento com encaminhamento dinâmico de pacotes
	Andar temporal ou de memória	memória com atraso fixo de intervalos de tempo	memória de fila de espera com atraso variável de pacotes

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

O atraso de comutação total em comutadores de pacotes oscila tipicamente entre 100 e 1000 μ s (componente fixa + variável). A componente variável é devida à acumulação maior ou menor de pacotes nas filas de espera, sendo caracterizada probabilisticamente.

A perda de pacotes nos respectivos comutadores ocorre quando as filas de espera não têm capacidade para armazenar os pacotes em excesso. A probabilidade de perda de pacotes deverá ser mantida sob apertados limites, com vista a satisfazer os objectivos globais de transparência semântica (valores típicos entre 10^{-8} e 10^{-11}).

O bloqueio de conexões é caracterizado por uma certa probabilidade de ocorrência, a qual depende da dimensão do comutador e da carga das conexões. Contudo, alguns comutadores de pacotes são não bloqueantes internamente: isto é, se existirem os recursos adequados à entrada e saída, nomeadamente largura de banda, os pacotes poderão ser transferidas da entrada para a saída sem perdas internas.

Tal como na comutação digital de circuitos, a comutação de pacotes exige normalmente a conjugação de dois tipos de andares:

- andares espaciais (S), em que os pacotes são encaminhadas dinamicamente em função da porta de destino;
- andares temporais ou de memória (M), em que os pacotes são armazenadas em filas de espera de tipo FIFO, aguardando a possibilidade de serem encaminhadas para a saída.

Comutadores de pacotes

Matrizes de comutação

Matriz M-S (memória à entrada)

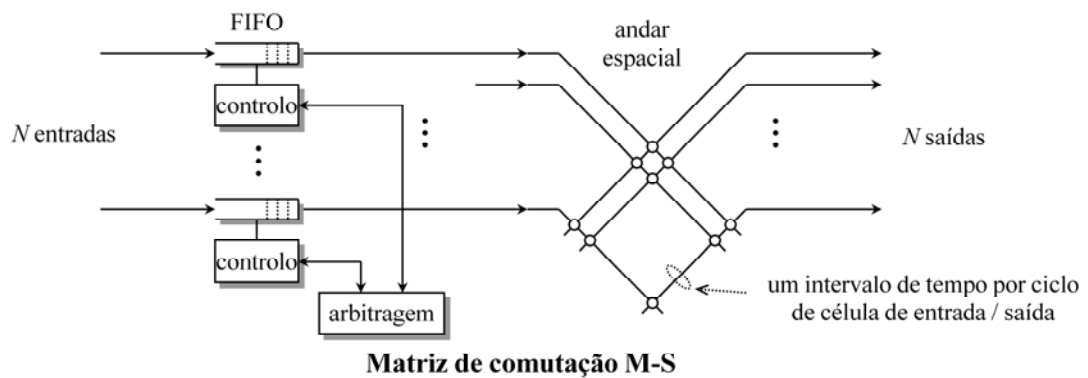
- em cada entrada, células aguardam num FIFO a oportunidade de saída livre
- requisitos de velocidade



- em cada ciclo de célula o FIFO pode ser escrito uma vez e lido uma vez
- o andar espacial opera à velocidade das entradas/saídas



- problema de bloqueio à cabeça da fila → atraso potencialmente excessivo



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Assumiremos, a partir de agora, que as matrizes de comutação são elementares, operando com unidades de comprimento fixo que, por analogia com as redes ATM, designaremos de células.

Nas matrizes M-S (com memória à entrada), as células são armazenadas em FIFO's à entrada, aguardando a sua vez para serem transmitidas para a saída, através de um andar espacial não bloqueante. Este andar poderá ser constituído por um barramento idêntico ao utilizado em comutação digital de circuitos.

O leitura de cada FIFO é controlada por um árbitro, que adoptará um algoritmo adequado.

Apesar de esta matriz operar com velocidades moderadas, ao nível das memórias e do andar espacial, há uma limitação grave que é o chamado "bloqueio à cabeça da fila". Com efeito, se, no limite, nas N entradas ocorrerem N células simultaneamente para a mesma saída, serão necessários N ciclos de células para as escoar totalmente para a saída. Nas várias entradas, as células subsequentes que poderiam ser destinadas a saídas livres, teriam de esperar que a célula à cabeça da respectiva fila fosse servida, para serem finalmente encaminhadas. Portanto, o atraso introduzido poderia atingir N ciclos de célula. Em situações de carga elevada, seriam introduzidos atrasos intoleráveis, pelo que esta arquitectura deve ser evitada.

Comutadores de pacotes

Matrizes de comutação

Matriz S-M (memória à saída)

– em cada saída, células aguardam num FIFO a oportunidade de saída livre

⊕ – atraso minimizado

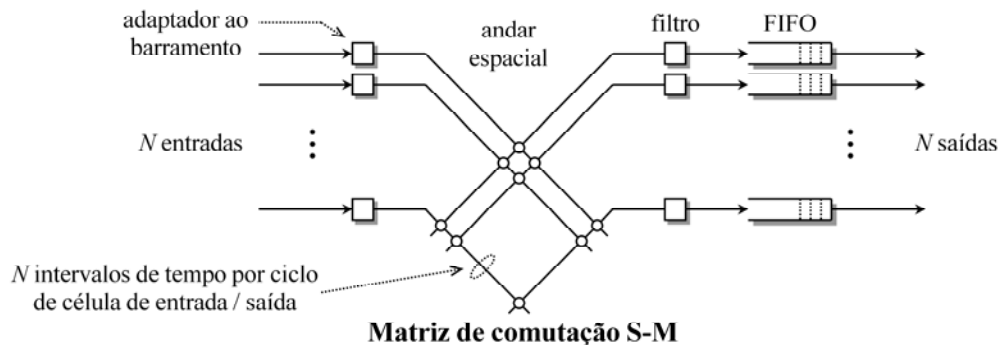
– requisitos de velocidade

⊖

- em cada ciclo de célula o FIFO pode ser escrito N vezes e lido uma vez

- o andar espacial opera a uma velocidade de N vezes a das entradas/saídas

– possível usar concentração no andar espacial para reduzir requisitos de velocidade



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Esta matriz encaminha imediatamente as células das entradas para filas de espera à saída, minimizando, portanto, o atraso introduzido. Os filtros que precedem cada FIFO seleccionam as células que dizem respeito à saída respectiva, inspeccionando o cabeçalho, ou, mais frequentemente, analisando o conteúdo de uma etiqueta colocada à entrada (no adaptador ao barramento), contendo informação explícita da porta de destino.

Contudo, na pior das hipóteses, poderá ocorrer que todas as entradas apresentem ao mesmo tempo uma célula para a mesma saída. Por este facto, em cada ciclo de célula das entradas/saídas, o andar espacial tem de ser capaz de escoar N células e as memórias FIFO têm de permitir a escrita de N células e a leitura de uma célula, o que implica uma velocidade eventualmente muito elevada.

Para minorar este problema, algumas implementações utilizam concentração, isto é, pressupõem que o número de células para a mesma saída que ocorrem simultaneamente nas entradas é menor do que N , pelo que o andar espacial e as memórias FIFO poderão operar a uma velocidade menor.

Comutadores de pacotes

Matrizes de comutação

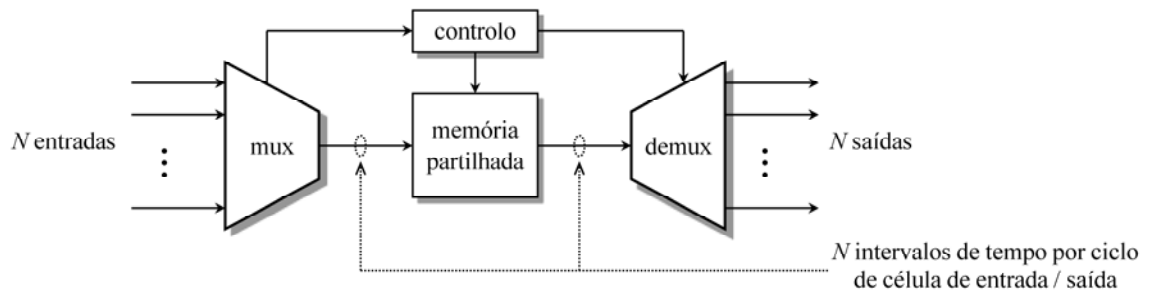
Matriz S-M-S com memória intermédia partilhada

– células aguardam saída livre num FIFO comum

- +

 • reduz dimensão de memória
- • aumenta a complexidade do controlo
- +

 – atraso minimizado
- requisitos de velocidade
- • em cada ciclo de célula o FIFO pode ser escrito N vezes e lido N vezes



Matriz de comutação S-M-S com memória partilhada

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Esta solução tem um comportamento, em termos de atraso, idêntico à matriz S-M com memória à saída, optimizando adicionalmente a dimensão de memória necessária, pela partilha inerente.

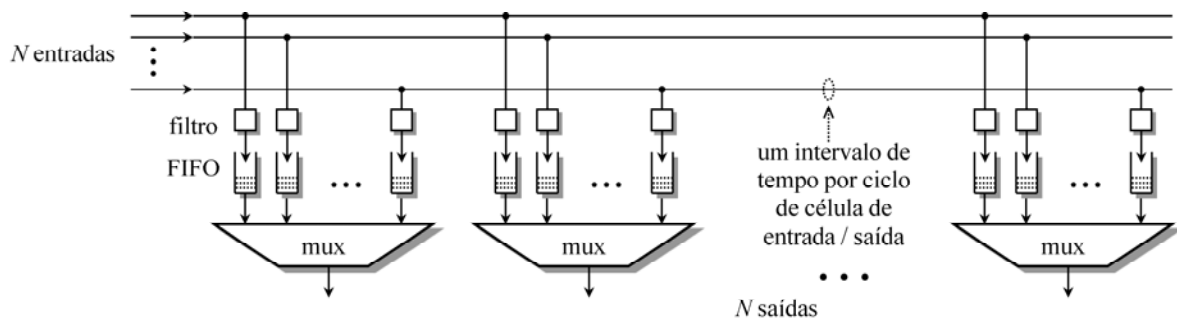
Contudo, além de implicar um processamento mais complexo, exige velocidades ainda mais elevadas de escrita e leitura na memória: em cada ciclo de célula das entradas/saídas, a memória terá N ciclos de escrita e N ciclos de leitura. Este requisito limita este tipo de matriz a aplicações em que a dimensão é muito reduzida.

Comutadores de pacotes

Matrizes de comutação

Matriz S-M-S com memória intermédia distribuída

- células aguardam saída livre num FIFO associado a cada entrada e saída
- [-] • aumenta dimensão de memória $\rightarrow N^2$ memórias e filtros
- [+] – atraso minimizado
- requisitos de velocidade
- [+] • em cada ciclo de célula o FIFO pode ser escrito uma vez e lido uma vez
- os andares espaciais operam à velocidade das entradas/saídas



Matriz de comutação S-M-S com memória distribuída

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

Esta arquitectura conjuga vantagens em termos de atraso, por efectuar a memorização à saída, com vantagens em termos de velocidade do barramento e de acesso às memórias, que são iguais às das entradas/saídas.

A limitação resulta do facto de o número de memórias e filtros crescerem com o quadrado das entradas, o que em comutadores de maiores dimensões poderá ser excessivo.

Comutadores de pacotes

Matrizes de comutação

Comparação de arquitecturas espaciais-temporais

- número e velocidade das memória referem-se a matriz com N entradas / N saídas
- velocidade das memórias expressa em ciclos de acesso por ciclo de célula

Arquitectura	Critério de comparação				
	Número de memórias	Velocidade das memórias	Dimensão das memórias	Desempenho de atraso	Arbitragem
Matriz M-S Memória à entrada	N	2	\pm	--	\pm
Matriz S-M Memória à saída	N	$N+1$	\pm	+	+
Matriz S-M-S Memória partilhada	1	$2N$	+	+	-
Matriz S-M-S Memória distribuída	N^2	2	-	+	+

Notas: + melhor \pm aceitável - pior -- inaceitável

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

A tabela mostra que não existe uma solução ideal em todos os critérios, pelo que haverá sempre um compromisso dependente da aplicação em causa.

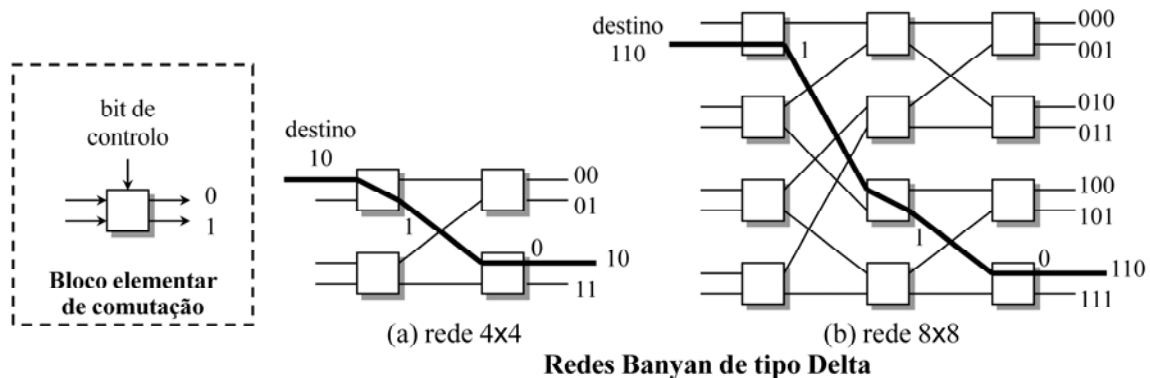
Comutadores de pacotes

Matrizes de comutação

Rede de interligação de andares múltiplos

MIN - Multistage Interconnection Network

- estrutura mais comum utiliza blocos elementares de 2x2 → rede Banyan
- pode ter propriedades de auto-encaminhamento → rede Delta
 - etiqueta com endereço de destino é acrescentada a cada célula, na entrada
 - bits da etiqueta são utilizadas como controlo de encaminhamento
 - o 1º bit do endereço de destino controla o 1º andar, o 2º bit o 2º andar, etc.



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

As redes de interligação de andares múltiplos são estruturas mais ou menos regulares baseadas em blocos elementares de pequena dimensão, o que facilita a sua concretização em circuitos integrados.

As propriedades de auto-encaminhamento podem facilmente ser demonstradas se se analisar o comportamento da estrutura elementar de 2x2 representada na figura, à esquerda: se o bit de controlo for "0", a célula é encaminhada para a saída superior, e se for "1", para a inferior.

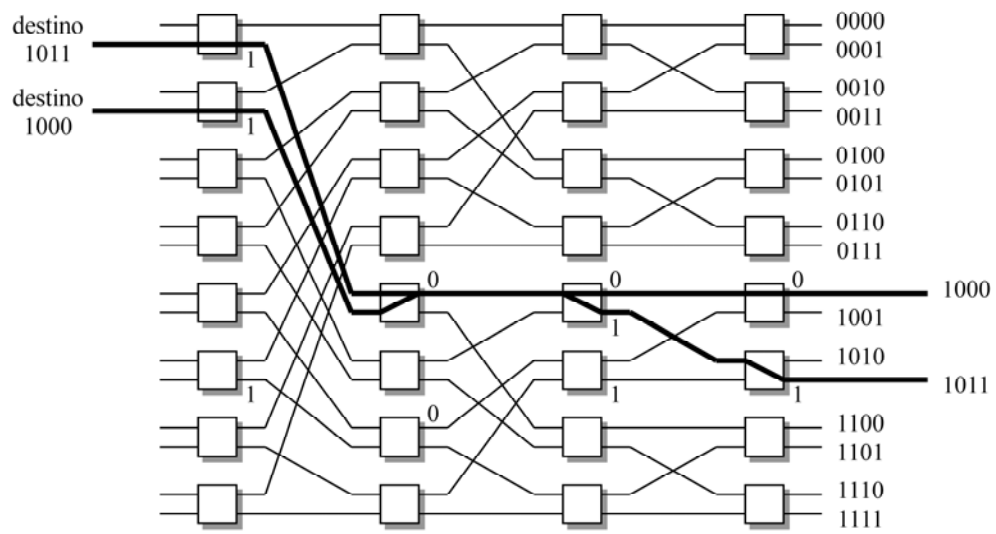
Interligando adequadamente os vários andares, obtém-se o encaminhamento pretendido, como é evidenciado pelas redes representadas na figura.

Comutadores de pacotes

Matrizes de comutação

Rede de interligação de andares múltiplos

– problema desta arquitectura: colisão pode ocorrer com facilidade



Colisão numa rede Banyan de tipo Delta

Sistemas de Telecomunicações

Comutação

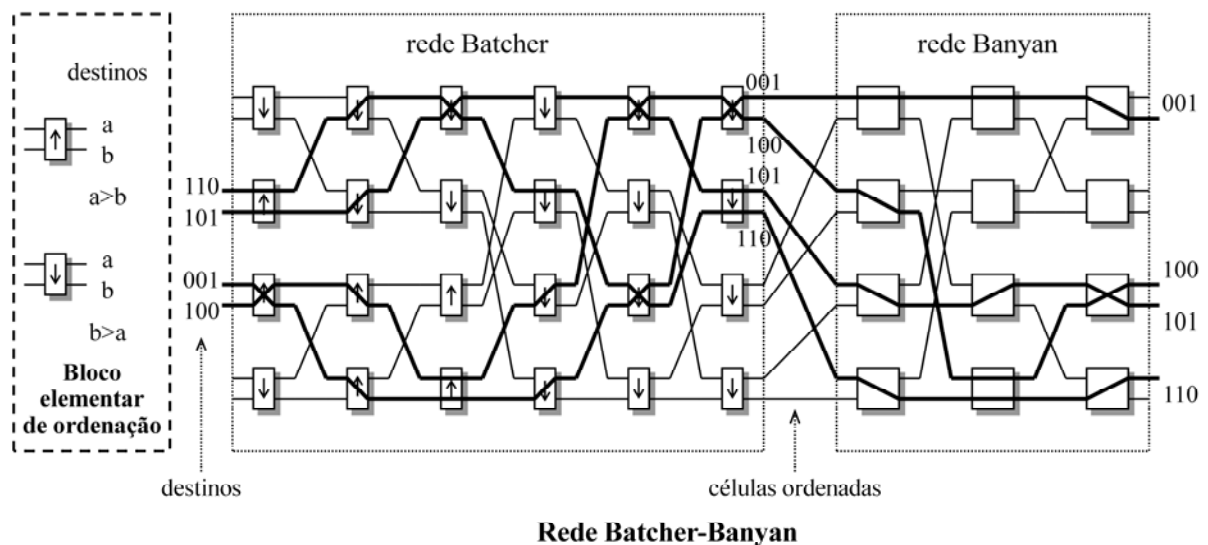
Um dos problemas destas redes é o facto de facilmente duas células "sobreporem" os respectivos caminhos, ocorrendo então uma colisão, como ilustra a figura.

Comutadores de pacotes

Matrizes de comutação

Rede de interligação de andares múltiplos

– problema da colisão pode ser resolvido através de ordenação → rede Batcher



Sistemas de Telecomunicações

Comutação

O problema anterior de colisão pode ser resolvido se se utilizar uma rede de ordenação a preceder a rede Banyan, como mostra a figura. Utilizam-se blocos elementares de ordenação, que analisam as etiquetas de destino das células e colocam as células à saída com uma ordenação de etiquetas pré-definida (da saída inferior para a superior: símbolo \uparrow - ordem crescente; símbolo \downarrow - ordem decrescente).

Subsiste ainda o problema de colisão de duas células com o mesmo destino, que poderá ser resolvido com a introdução de FIFO's internos em cada bloco elementar. Esta solução, apesar de ter a vantagem distribuir a memorização, introduz ainda um certo atraso de "cabeça de fila". Existem alguns mecanismos complementares para minorar este efeito, nomeadamente a recirculação de células, isto é, as células numa situação de conflito regressam à entrada para uma nova tentativa (por sua vez, exige capacidade de reordenação de células à saída).

De tudo o que se disse nesta secção, resulta a conclusão de que a comutação de pacotes não é um processo trivial, existindo ainda um largo campo para inovações.