

Capítulo 4

Comutação Digital por Circuito

4.1 Introdução

A comutação por circuito é uma técnica de comutação em que os recursos alocados ficam reservados exclusivamente para aquela comunicação, até o término da conversação. É uma técnica mais conveniente para redes telefônicas, onde os sinais de voz necessitam tratamento em tempo real, mas pode também ser utilizada para comutar dados.

As redes telefônicas analógicas são todas baseadas nessa técnica, e é alocado um conjunto de circuitos que correspondem neste caso a enlaces físicos. No caso da comutação digital por circuito, é também alocado um conjunto de circuitos, mas neste caso, os circuitos correspondem a intervalos de janelas de tempo (time slots) que podem estar multiplexados temporalmente em um enlace.

Os objetivos deste capítulo são apresentar os conceitos básicos da técnica de comutação digital, técnicas de análise e de projeto de centrais digitais e apresentar uma central comercial.

4.2 Estruturas de Centrais de Comutação Digital

Uma configuração das partes básicas de uma central de comutação digital é mostrada na Fig. 4.1.

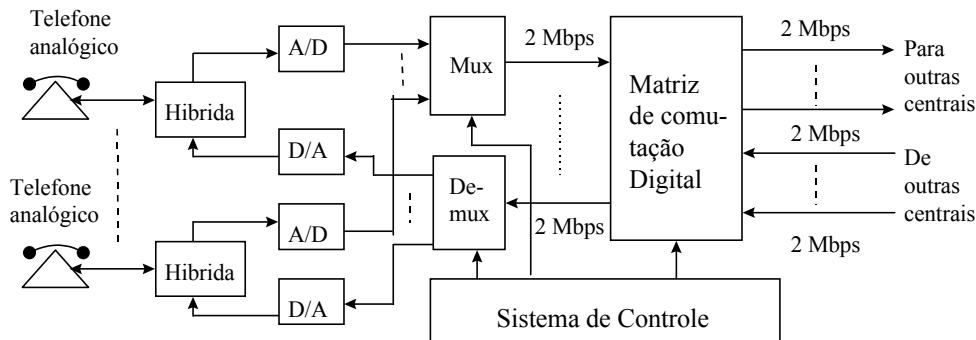


Figura 4.1 Configuração funcional das partes básicas de uma central de comutação digital.

A Fig. 4.1 mostra uma configuração em que os aparelhos telefônicos operam a dois fios e são analógicos. A função da híbrida é separar o sinal que chega do aparelho telefônico do sinal que está sendo transmitido ao aparelho telefônico. A separação dos sinais é importante para fins de digitalização que pode ser realizada somente em um sentido. Quando o sinal analógico é recebido na central, ele sofre o processo de digitalização. Inicialmente, o sinal é filtrado, eliminando as componentes de frequência acima de 3.4 KHz (não mostrado na figura). Em seguida, é submetido ao conversor analógico-digital (A/D) e, finalmente, enviado ao multiplexador (Mux). Os sinais digitais que saem do demultiplexador (Demux) passam por

conversor digital-analógico (D/A) e são enviados, na forma de sinais analógicos, ao aparelho telefônico.

A multiplexagem é feita em altas taxas de bits, por exemplo, utilizando um PCM de 2,048 Mbps. A parte essencial da central digital, mostrada na Fig. 4.1, é formada pelos blocos matriz de comutação e sistema de controle. Na matriz de comutação estão conectados os enlaces PCMs que multiplexam temporalmente os canais de voz. O sistema de controle supervisiona tanto a matriz de comutação como os multiplexadores e os demultiplexadores (que em conjunto serão denominados de maneira simplificada de **DEMUX**).

A função principal da matriz de comutação é comutar cada canal PCM de 64 kbps dos enlaces multiplexados de entrada para cada um dos canais PCMs de 64 Kbps dos enlaces multiplexados de saída. Esta função é executada quando as conversações já estão em andamento.

O sistema de controle é o principal elemento de uma central, e tem a função de gerenciar toda a central.

As principais funções de um sistema de controle são:

- a) Atendimento: atender um pedido de serviço de um aparelho telefônico ou de uma outra central (origem de uma chamada telefônica).
- b) Recepção de dígitos: receber o número do assinante chamado.
- c) Interpretação: analisar o número recebido para determinar providências a tomar.
- d) Seleção de caminhos internos: selecionar um conjunto de canais ou time slots (ou enlaces) na matriz de comutação.
- e) Estabelecimento de caminho: controlar os elementos da matriz de comutação para estabelecer um canal físico para uma chamada telefônica.
- f) Alerta: sinalizar os usuários chamado e chamador (tocar campainha do chamado e dar retorno ao chamador).
- g) Supervisão: monitorar o chamador e o chamado para, logo após o término da ligação, desconectar e liberar os canais.
- h) Sinalização entre centrais: trocar as informações do chamado e do chamador com outro sistema de controle, no caso em que o telefone chamado estiver em outra central.
- i) Tarifação: elaborar a listagem das chamadas feitas por usuários.
- j) Manutenção: executar as funções de manutenção da central.

Em geral, as centrais digitais são divididas em vários módulos. Essa divisão em módulos permite bastante flexibilidade, podendo desenvolver módulos para cada tipo de aplicação. Por exemplo, na central digital da Fig. 4.1, pode-se englobar as híbridas, os conversores A/D e D/A e os DEMUXs em um módulo denominado de módulo de linha (ML) analógico. Esse módulo seria responsável por um conjunto de telefones analógicos. Outros módulos poderiam ser o ML digital e o módulo de tronco, MT, que seriam responsáveis por telefones digitais e troncos (analógicos e/ou digitais), respectivamente. Os troncos digitais são os enlaces PCMs, mostrados na Fig. 4.1.

Dependendo do tamanho da central, a matriz de comutação que será estudada em detalhes nas seções 4.3 e 4.4, poderá ter uma relativa complexidade e necessitará de controladores específicos.

Se todas as funções de a) a j) são executadas por um único processador central, como mostrado na Fig. 4.1, tem-se o caso de uma central de comutação de controle centralizado. Nesse caso, o processador central é duplicado para aumentar a confiabilidade da central.

As centrais digitais mais recentes têm em menor ou maior escala, as funções distribuídas em vários processadores. A Fig. 4.2 mostra o caso em que foram colocados vários processadores de rede e um processador central. As funções são divididas entre os processadores de rede e o processador central. Os processadores de rede podem conter as funções c), e), f) e g), e as outras

funções que necessitam de informações globais, poderão ser executadas pelo processador central. Para executar essas funções, os processadores devem se comunicar entre si, e também com o processador central.

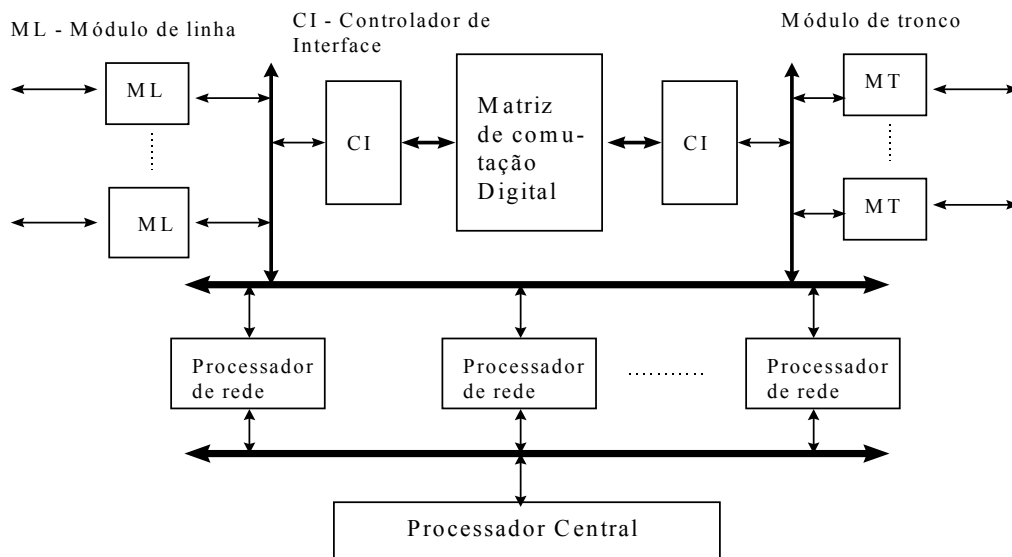


Figura 4.2 Central com algumas funções distribuídas.

Os controladores de interface CI, na Fig. 4.2, têm as funções de atuar na matriz de comutação digital, após receberem comandos dos processadores de rede.

Pode-se pensar em estruturas de centrais de comutação digital com funções completamente distribuídas, como mostrado na Fig. 4.3.

Nesta estrutura, cada processador de rede incorpora todas as funções do processador central e troca as informações entre eles para estabelecer e liberar caminhos na matriz de comutação e gerenciar os módulos.

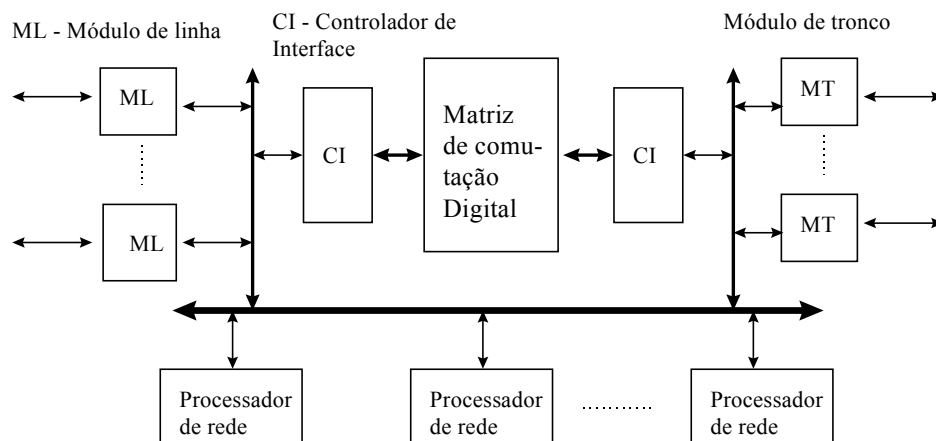


Figura 4.3 Central com funções distribuídas.

4.3 Matriz de Comutação Digital

A matriz de comutação é a parte da central onde são feitas as conexões físicas das conversações telefônicas. O sistema de controle, após receber as informações dos usuários na

fase da sinalização e analisá-las, atua na matriz de comutação para estabelecer caminhos em que os sinais digitais das conversações telefônicas irão trafegar.

Para estabelecer as funções que a matriz de comutação deve executar durante uma conversação telefônica, é utilizado o exemplo da Fig. 4.4. O exemplo da figura mostra uma matriz de comutação com 3 enlaces digitais (por ex. PCM) de entrada e 3 enlaces digitais de saída (abreviadamente uma central 3 x 3). Para simplificar a análise, em um enlace digital, cada quadro contém somente duas janelas temporais (ou time slots). As janelas temporais $t'_1, t'_2, \dots, t'_{n-1}, t'_n$ de saída são ocorrências correspondentes as janelas $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ de entrada, respectivamente, com pequenos atrasos de tempo introduzidos pela matriz de comutação. Cada janela temporal acomoda um canal. Os quadros e as janelas temporais de todos os enlaces são sincronizados, de tal modo que as funções de comutação são executadas de uma maneira síncrona. O conteúdo de cada canal de entrada deve ser comutado para qualquer um dos canais de saída. A figura mostra a situação em que os conteúdos de canais em cada enlace de entrada estão definidos, e serão iguais em todos os quadros. Após a comutação, os conteúdos dos canais em cada enlace de saída, também, são definidos e serão iguais em todos os quadros.

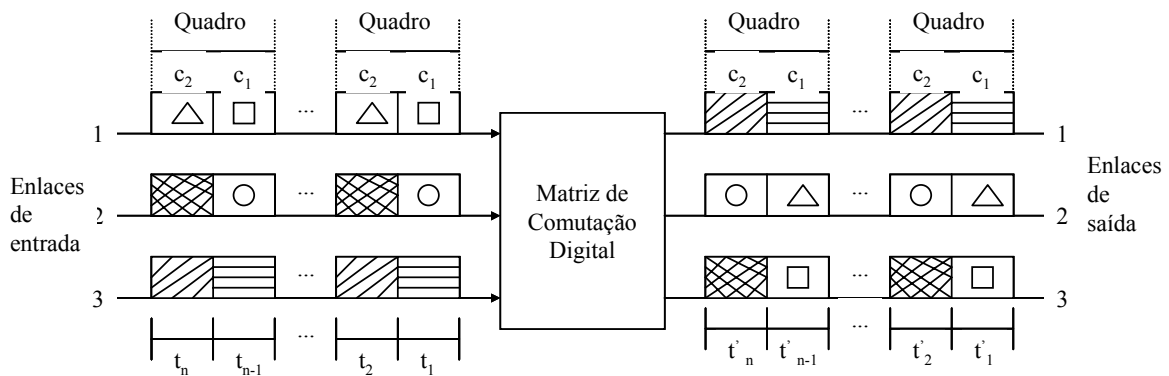


Figura 4.4 Funções da matriz de comutação.

Pode-se observar pela figura que o conteúdo (representado por um quadrado) do canal c_1 do enlace 1 de entrada, é transferido para o canal c_1 do enlace 3 de saída. O conteúdo de c_1 do enlace 3 de entrada é transferido para o canal c_1 do enlace 1 de saída. Situações similares ocorrem com os conteúdos dos canais c_2 dos enlaces 2 e 3 de entrada que são transferidos para os canais c_2 dos enlaces 3 e 1, respectivamente. Assim, os conteúdos foram comutados de um enlace de entrada para um outro enlace de saída, em janelas de tempo correspondentes. Essa comutação é denominada de comutação espacial. Um outro tipo de transferência que ocorre na figura é aquele em que o conteúdo (representado por um círculo) de canal c_1 do enlace 2 de entrada, é comutado para o canal c_2 do enlace 2 de saída. Neste caso, houve uma mudança na escala de tempo. O conteúdo foi atrasado no tempo, para ser transmitido na janela de tempo t'_2 . Em uma outra situação, o conteúdo (representado por triângulo) do canal c_2 do enlace 1 de entrada é transferido para c_1 de saída. Neste caso, o conteúdo que chegou na janela de tempo t_2 , foi transferido para a janela de tempo t'_1 , que é um tempo adiantado em relação ao tempo que chegou. Esse tipo de comutação em que os conteúdos podem ser adiantados ou atrasados, é denominado de intercâmbio de janelas temporais. Portanto, a matriz de comutação desempenha duas funções principais: comutação espacial e intercâmbio de janelas temporais ou estágio temporal – T. Detalha-se, a seguir, como essas funções podem ser implementadas.

Intercâmbio de janelas temporais (time slots) ou estágio temporal - T

Em um estágio temporal, o conteúdo de qualquer uma das janelas de tempo de entrada deve ser transferido para qualquer uma das janelas de tempo de saída.

Essa função pode ser realizada através de memórias de dados e de controle, como mostrado na Fig. 4.5. O exemplo da figura mostra um enlace digital em que cada quadro contém 4 janelas temporais. Na memória de dados, são armazenados os conteúdos das janelas temporais e a memória de controle contém as informações de endereços que são utilizadas na fase de leitura dos conteúdos da memória de dados. Essas informações são escritas na fase de sinalização de uma chamada telefônica, e são mantidas até o término daquela chamada.

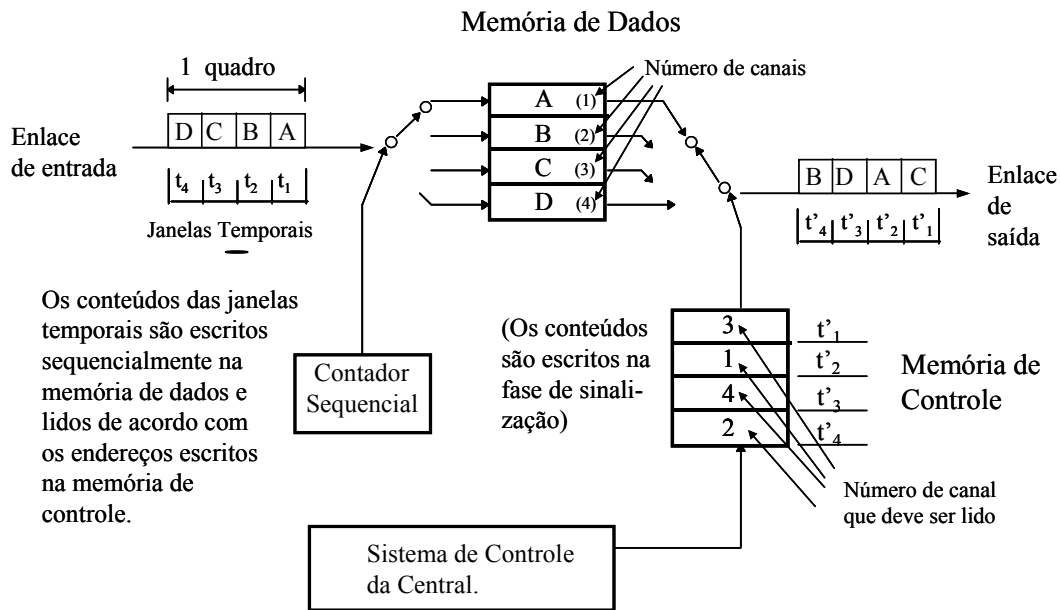


Figura 4.5 Intercâmbio de janelas temporais ou estágio temporal - T.

A Fig. 4.5 mostra que na fase inicial, os conteúdos das janelas temporais são armazenados na memória de dados de uma maneira seqüencial, utilizando um contador seqüencial para fazer o endereçamento das posições na memória de dados. Em uma fase seguinte os dados da memória são lidos na seqüência definida pela memória de controle.

Para melhor exemplificar o funcionamento do estágio temporal, considere o exemplo da Fig. 4.6.

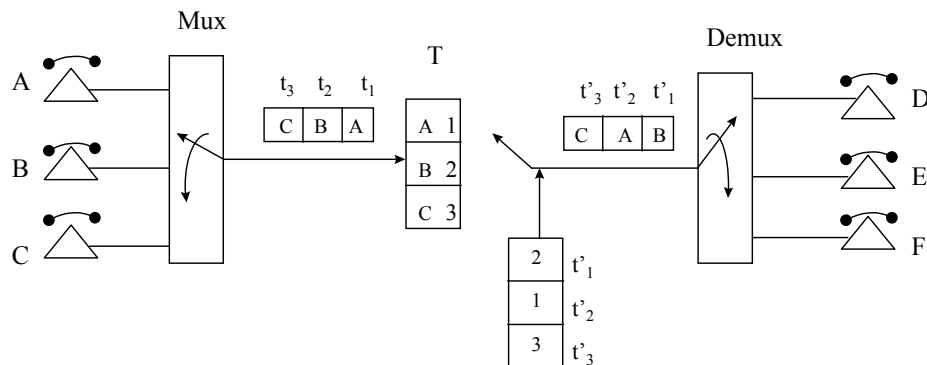


Figura 4.6 Comutação com somente um estágio temporal.

No esquema de comutação mostrado na Fig. 4.6, os seguintes pares de assinantes estão conversando: A e E, B e D e C e F. A figura mostra somente um sentido de transmissão. Em conversação normal deve haver um outro enlace, transportando os conteúdos em sentido oposto.

A multiplexação temporal é feita de A para C, de tal modo que os conteúdos aparecerão na seqüência mostrada na figura. No estágio temporal, os conteúdos são armazenados na memória de dados, na seqüência de chegada e a leitura deve obedecer a seqüência da memória de controle, que foi escrita de tal modo que haja a correta demultiplexação. A demultiplexação é feita, temporalmente, de D para F.

O processo de comutação, acima descrito, é repetido a cada quadro.

Comutação espacial

Em uma comutação espacial, o conteúdo de uma janela temporal (ou canal) de um enlace de entrada deve ser transferido para uma outra janela de um enlace qualquer de saída.

A Fig. 4.7 mostra um esquema de comutação espacial com dois enlaces de entrada e dois de saída.

Os conteúdos da memória de controle são utilizados para abrir e fechar as portas ANDs nos intervalos adequados de tempo para transferir os conteúdos das janelas de tempo de um enlace de entrada para um enlace de saída. Essa transferência é feita de maneira síncrona. Por ex., no tempo t_1 , os conteúdos A1 e B2 dos enlaces 1 e 2 de entrada são transferidos simultaneamente para os enlaces 1 e 2 de saída. No tempo t_2 , os conteúdos A2 e B2 são transferidos simultaneamente, e assim por diante. Na comutação espacial não há mudanças de posições nas janelas de tempo. Pode haver somente retardos correspondentes aos atrasos das portas.

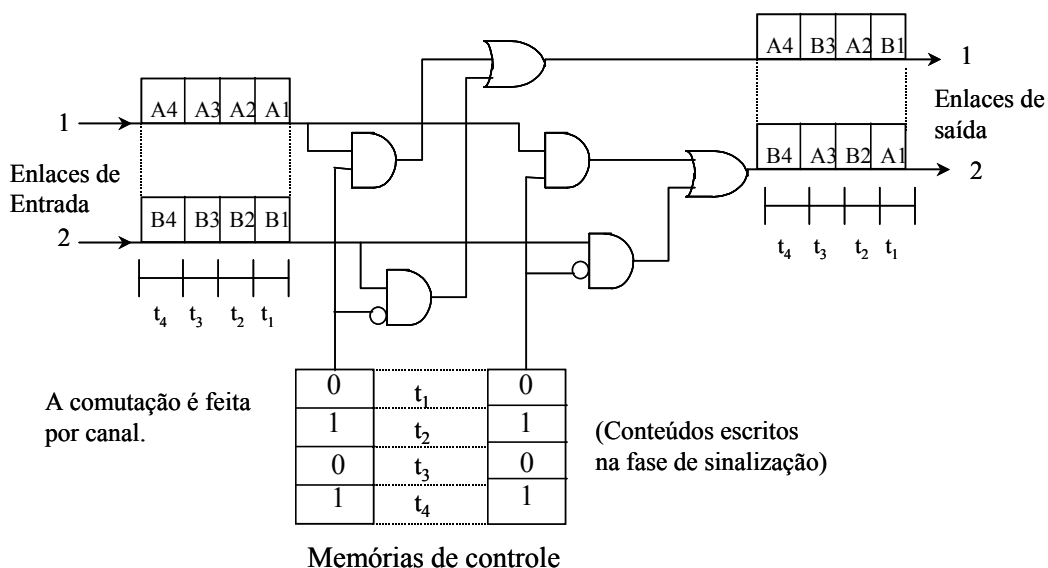


Figura 4.7 Comutação espacial

Uma matriz de comutação digital pode operar somente com um estágio temporal como mostrado no exemplo da Fig. 4.6, mas é, em geral, constituída de combinações de estágios temporais e espaciais como mostrado na Fig. 4.8. A figura mostra algumas combinações

possíveis de estruturas de matriz. Uma matriz TS é a uma estrutura em que cada um dos enlaces de entrada possui um estágio temporal e um único estágio espacial para comutar as janelas de tempo para os respectivos enlaces de saída. A matriz STS utiliza estágios espaciais na entrada e na saída e estágios temporais nos pontos centrais. Por outro lado, a matriz TST utiliza estágios temporais na entrada e na saída e um estágio espacial conectando esses dois estágios.

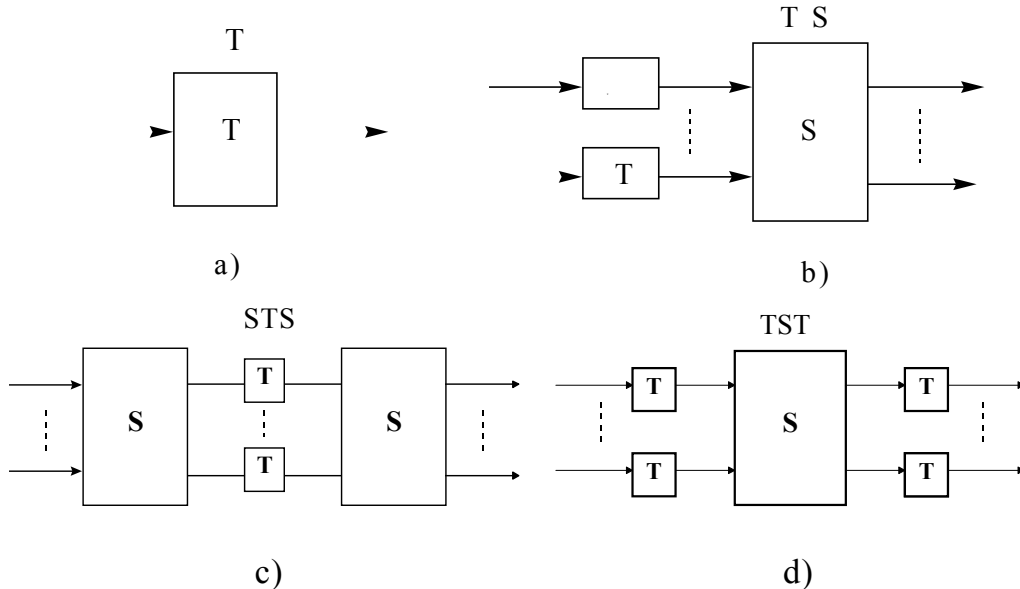


Figura 4.8 Algumas estruturas possíveis para a matriz de comutação digital

Em centrais de comutação digitais operando comercialmente, existem outras estruturas, mas são variações em torno das estruturas mostradas na Fig. 4.8. Uma boa parte das centrais comerciais tem a estrutura TST. Na seção 4.4, será discutida uma técnica de análise de estruturas de matriz de comutação, e demonstrar que a estrutura TST tem vantagem em relação às outras estruturas mostradas na Fig. 4.8.

Para mostrar a operação de uma estrutura TS, considere o exemplo da Fig. 4.9.

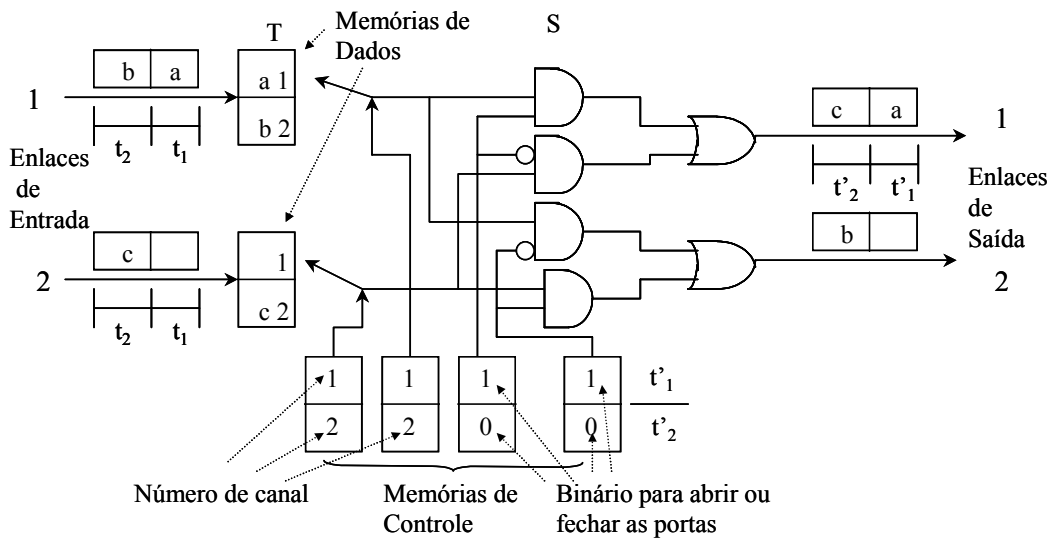


Figura 4.9 Exemplo de operação de uma estrutura TS.

O exemplo da Fig. 4.9 mostra uma estrutura com dois enlaces de entrada e dois de saída. O conjunto de portas ANDs e ORs corresponde ao estágio espacial. Este conjunto atua de maneira sincronizada com a fase de leitura de um conteúdo de uma janela temporal da memória de dados. No exemplo, o canal 1 do enlace 2 que está livre não poderá ser utilizado para fazer conexão com o enlace 1 da saída, pois esse enlace tem todos os canais ocupados; poderia haver conexão com o enlace 2 que tem também um canal livre. Essa análise de combinação entre os canais de entrada e de saída para verificar viabilidade de conexão é feita pelo sistema de controle, na fase de sinalização.

A Fig. 4.10 mostra um exemplo de estrutura TST.

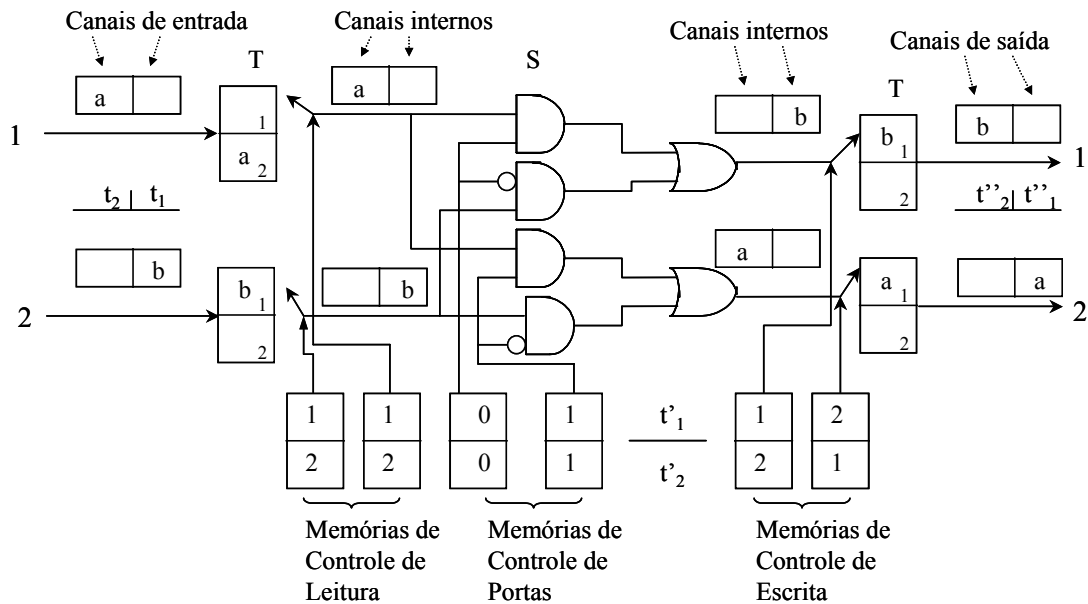


Figura 4.10 Exemplo de estrutura TST.

O número de posições na memória de controle corresponde ao que é chamado de canais internos da matriz. No exemplo da figura, tem-se, portanto, 2 canais internos e 2 canais em um quadro de um enlace digital de entrada ou de saída. Os conteúdos dos canais de entrada são armazenados nas memórias de dados, seqüencialmente, como mostra a figura. As leituras das memórias de dados de entrada são controladas pelas memórias de controle, que no exemplo da figura, são feitas seqüencialmente. Simultaneamente às leituras das memórias de dados, as portas do estágio espacial são abertas ou fechadas, de acordo com as memórias de controle das portas, e também, são escolhidas as posições das memórias de dados de saída, conforme as memórias de controle de escrita. As memórias de dados de saída são lidas seqüencialmente. A estrutura TST permite flexibilidade, pois, no exemplo da Fig. 4.10, pode-se fazer uma leitura não seqüencial nas memórias de dados de entrada e uma escrita seqüencial nas memórias de dados de saída. Outras soluções poderiam ser implementadas, inclusive soluções dinâmicas, em que cada nova conexão, as memórias de controle seriam totalmente reescritas. Entretanto, isso leva a uma complexidade muito grande, de modo que somente soluções estáticas são adotadas, isto é, uma vez que os canais internos são alocados a uma conexão, esses canais ficam alocados até o final dessa conexão.

A adoção de solução estática leva a matriz de comutação a ter problema denominado de bloqueio interno. Por exemplo, na Fig. 4.10, o canal 2 do enlace 2 de entrada e o canal 2 do

enlace 2 de saída estão livres, de tal modo que poderíamos estabelecer entre esses dois canais, uma nova conexão. Entretanto, isso não é possível, pois, para conectar esses dois canais, o ramo inferior do estágio espacial deve ser utilizado. Mas, o canal 1 interno, do ramo inferior, está sendo utilizado para comutar o conteúdo b, e o canal 2 está sendo utilizado para comutar o conteúdo a. Se adotasse a solução dinâmica, poder-se-ia utilizar o canal 1 interno para transmitir o conteúdo a, em vez do canal 2.

Em vez da solução dinâmica, existe uma outra solução mais simples, que será explicada através da Fig. 4.11.

A Fig. 4.11 mostra o esquema de comutação em que não há o problema de bloqueio interno. Observa-se que foi aumentado um canal interno. Assim, aquela conexão através do canal 2 do enlace 2 de entrada e o canal 2 do enlace 2 de saída, pode ser realizada utilizando, agora, o canal 3 interno, sem a necessidade de reconfigurar todos os canais internos. Os traços (-) que aparecem na memória de controle significam que as posições das memórias não são lidas naquele período de tempo. Essa técnica de aumentar os canais internos em comutadores digitais pode ser implementada facilmente, aumentando a frequência do relógio que controla o estágio espacial.

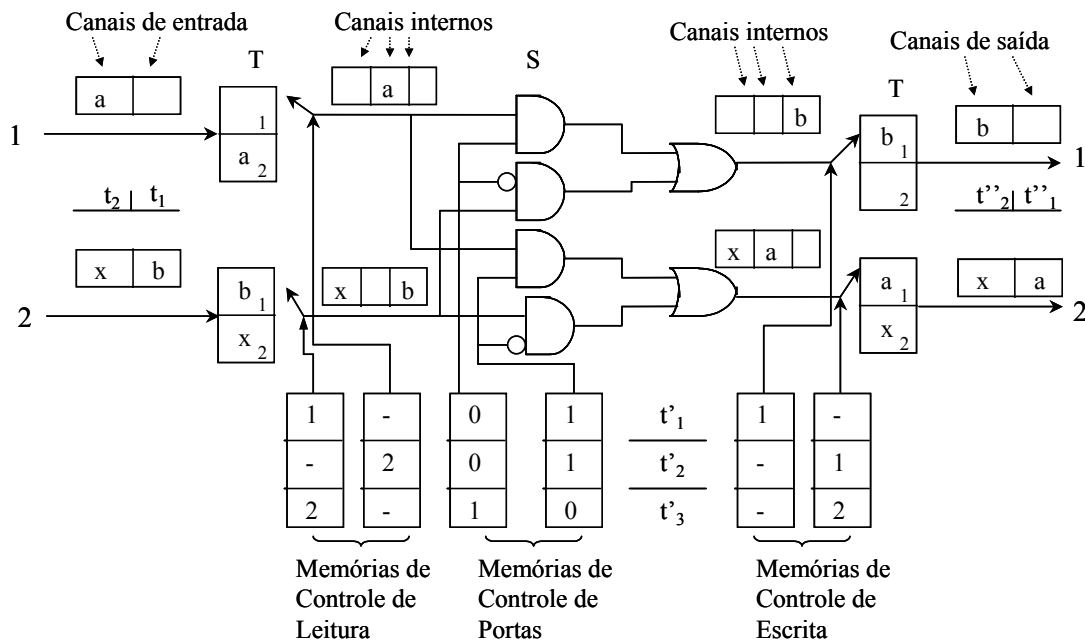


Figura 4.11 Exemplo de uma estrutura TST com número de canais internos maior que os número de canais externos (canais dos enlaces de entrada ou de saída).

Para uma matriz de comutação TST de tamanho qualquer, em que o número de enlaces é n , e o número de canais por quadro é m , qual deve ser o número de canais internos k , para que não haja bloqueio interno? Esta pergunta será respondida na próxima seção, após estudarmos as técnicas de análise das matrizes de comutação digital.

4.4 Análise da Matriz de Comutação Digital

Estuda-se, nesta seção, uma técnica de análise de bloqueio interno da matriz de comutação digital. Inicialmente, são estudadas as estruturas de matriz de comutação simples,

sem considerar que os enlaces são multiplexados. Portanto, cada enlace possuirá somente um canal. A seguir, as estruturas em multiestágios serão analisadas e serão propostas técnicas de equivalências dos estágios temporais e espaciais com as estruturas estudadas. Finalmente, as matrizes de comutação digitais serão analisadas.

A estrutura de matriz mais simples é aquela conhecida como matriz quadrada a quatro fios, mostrada na Fig. 4.12.

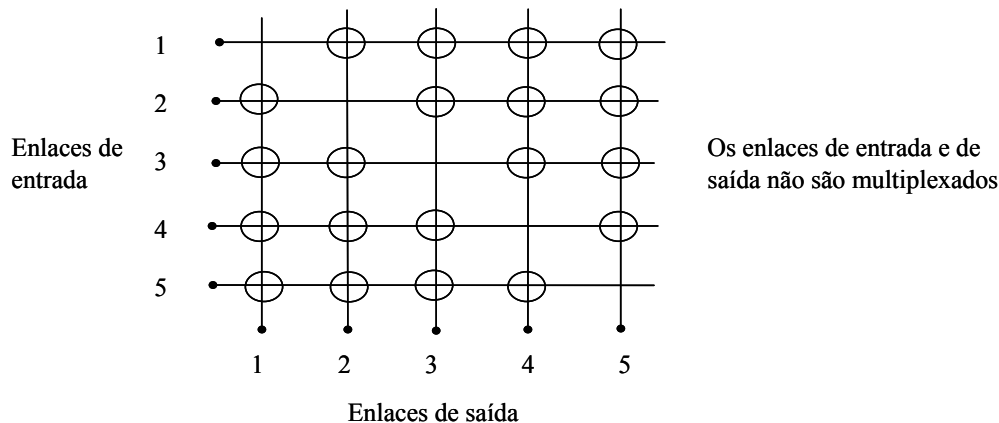


Figura 4.12 Matriz quadrada.

Nos pontos de cruzamentos desta estrutura são utilizados relés ou chaves analógicas no caso de sinais analógicos ou portas ANDs ou NANDs se os sinais forem digitais. Quando se quer comutar, por exemplo, o enlace 1 de entrada com o enlace 2 de saída, o ponto de cruzamento correspondente ficará conectado, interligando os enlaces. Não há necessidade de componente eletrônico no cruzamento entre enlace 1 de entrada e 1 de saída, pois, não se espera que um terminal vá se conectar com ele mesmo. O mesmo acontecendo com os outros pontos em que não aparecem os círculos (veja a Fig. 4.12).

Para se comparar estruturas de matrizes, será utilizado o critério de contagem total de pontos de cruzamentos. Por exemplo, na matriz quadrada são $(N^2 - N)$ pontos de cruzamentos, onde N representa o número de enlaces de entrada ou de saída. Supondo que cada ponto de cruzamento tenha um custo, quanto maior for o número de pontos de cruzamento, maior será o custo.

Na estrutura quadrada, existe um caminho, por ex., do enlace 1 para 2, e também um outro caminho de 2 para 1. Em algumas aplicações, não há necessidade de se ter 2 caminhos diferentes. Nessas situações, pode-se utilizar a matriz triangular mostrada na Fig. 4.13.

O número de pontos de cruzamentos em uma matriz triangular é $(N^2 - N) / 2$. As matrizes quadrada e triangular são estruturas que não têm bloqueios internos, isto é, sempre existe um caminho entre um enlace de entrada e de saída. Entretanto, essas duas estruturas poderão ter números grandes de pontos de cruzamentos, para valores grandes de N . Por exemplo, para $N = 10\ 000$ enlaces, uma matriz quadrada terá $N^2 - N = 99\ 990\ 000$ pontos e uma matriz triangular terá $49\ 995\ 000$ pontos. Como cada ponto representa um componente eletrônico, essas estruturas poderão ter custos proibitivos.

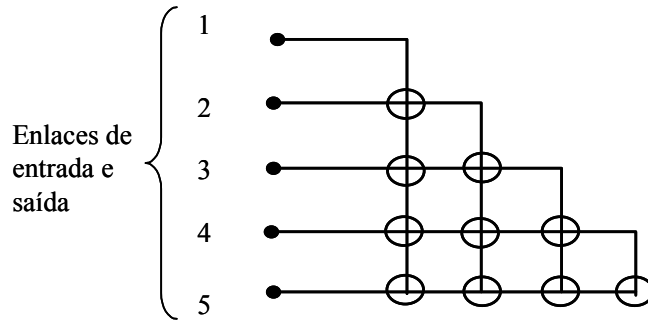


Figura 4. 13 Matriz triangular.

O problema básico dessas estruturas é que os pontos de cruzamentos não são compartilhados; cada conexão utiliza um ponto de cruzamento. Para diminuir o número de pontos de cruzamentos, existem estruturas que compartilham os caminhos internos da matriz. Em muitos casos, essas diminuições são conseguidas impondo bloqueios internos. A Fig. 4.14 mostra duas estruturas com pontos de cruzamentos compartilhados.

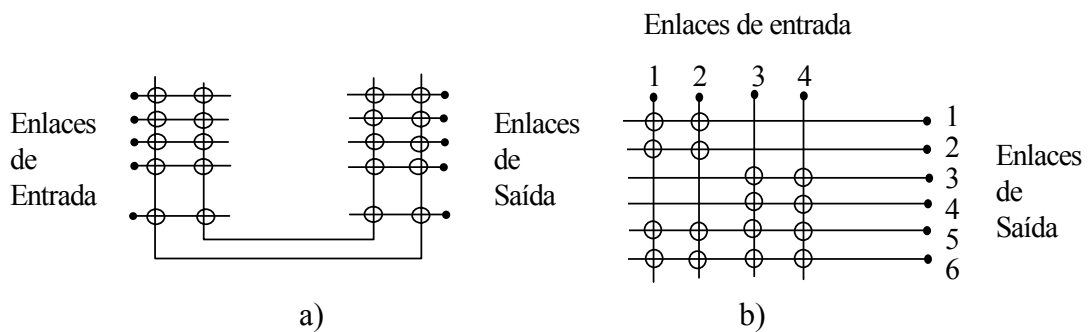


Figura 4.14 Estruturas com bloqueio interno.

Na estrutura da Fig. 4.14 a), existem dois caminhos interligando os enlases de entrada e de saída. Neste caso, se $N = 10$, tem-se 40 pontos de cruzamentos, uma economia de 50 pontos de cruzamentos em relação a matriz quadrada que teria neste caso 90 pontos de cruzamentos. Mas, nesta estrutura, são possíveis somente duas conversações simultâneas. Na estrutura da Fig. 4.14 b), os enlases de entrada 1 e 2 não têm acesso às saídas 3 e 4 e, os enlases 3 e 4 não têm acesso às saídas 1 e 2. Este tipo de estrutura é denominado de acessibilidade limitada, e é utilizado para algumas aplicações específicas. Para $N = 6$, tem-se 22 pontos de cruzamentos em comparação a 30 pontos para o caso da matriz quadrada.

Uma outra estrutura para compartilhar os pontos de cruzamentos é aquela denominada de multiestágios. Em estruturas multiestágios, utilizam-se várias matrizes retangulares, denominadas de matrizes básicas, que são interligadas umas a outras, formando vários estágios de matrizes. A Fig. 4.15 mostra a representação de uma matriz básica.

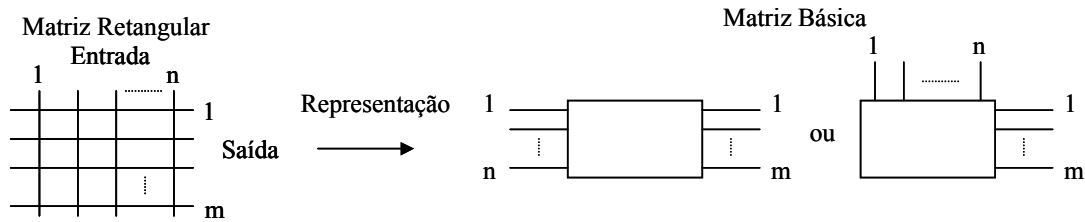


Figura 4.15 Representação de uma matriz retangular.

As matrizes básicas podem ser interligadas, obedecendo a algum critério. O critério que será adotado é dividir as matrizes básicas em estágios, e interligar uma matriz de um estágio a outra de outro estágio, através de um único caminho, como mostrado na Fig. 4.16.

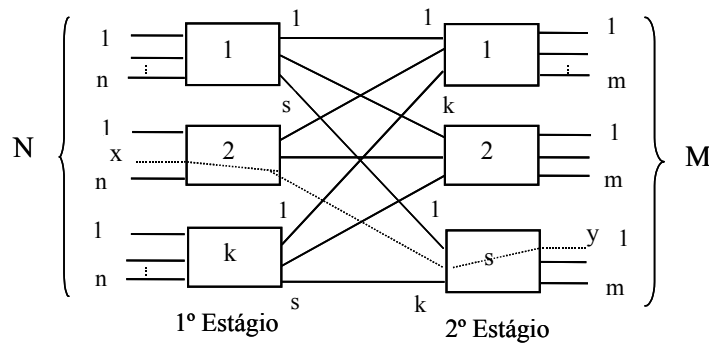


Figura 4.16 Interligação entre matrizes básicas de 2 estágios.

Pode-se observar pela figura que a entrada X interliga com Y, através de um único caminho. De modo análogo, verifica-se que a entrada X pode interligar a qualquer uma das saídas M, através de um único caminho. Esta estrutura é denominada de matriz de comutação de 2 estágios. É uma estrutura pouco flexível, pois, permite pouca alternativa de caminhos entre uma entrada e uma saída. Uma estrutura mais interessante é a estrutura com 3 estágios, como mostrado na Fig. 4.17.

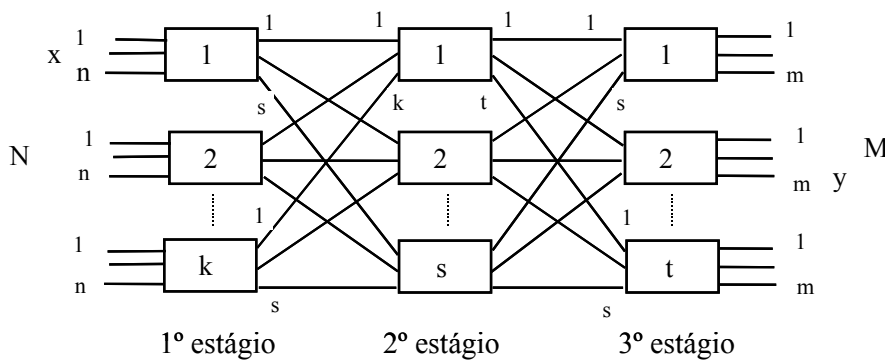


Figura 4.17 Matriz de comutação com 3 estágios.

A matriz, mostrada na figura, possui k matrizes básicas no 1º estágio, s matrizes básicas no 2º estágio e t matrizes básicas no 3º estágio. Cada uma das k matrizes do 1º estágio interliga com as s matrizes do 2º estágio através de um único caminho (e vice-versa), e cada uma das s

matrizes básicas do 2º estágio interliga com as t matrizes do 3º estágio, através de um único caminho (e vice-versa).

Nesta estrutura, a entrada X pode se interconectar com a saída Y , através de s caminhos diferentes. Portanto, são vários caminhos alternativos para interligar uma entrada a uma saída.

Exemplo 4.1

Seja uma central de comutação utilizando uma matriz de comutação de 3 estágios. A central possui 9 enlaces de entrada e 9 enlaces de saída. Todos os três estágios têm o mesmo número de matrizes básicas e é igual a 3.

a) Desenhe uma estrutura de conexão para essa matriz, especificando os números de entradas e de saídas para cada matriz básica.

b) Estudar uma situação de bloqueio interno. (Uma situação de bloqueio interno é quando por ex., uma entrada X e uma saída Y estão livres, mas não podem fazer a conexão por falta de um caminho interno).

Solução:

a) A Fig. 4.18 mostra a estrutura e as conexões pedidas. Como o enunciado diz que cada estágio contém 3 matrizes básicas, e o total de enlaces de entrada ou de saída é 9, tem-se em cada matriz básica do 1º estágio, 3 enlaces de entrada. Pelo mesmo raciocínio cada matriz básica do 3º estágio tem 3 enlaces de saída. Como a interligação entre as matrizes básicas dos estágios é feita através de um único enlace, as matrizes básicas do 2º estágio terão 3 enlaces de entrada e de saída.

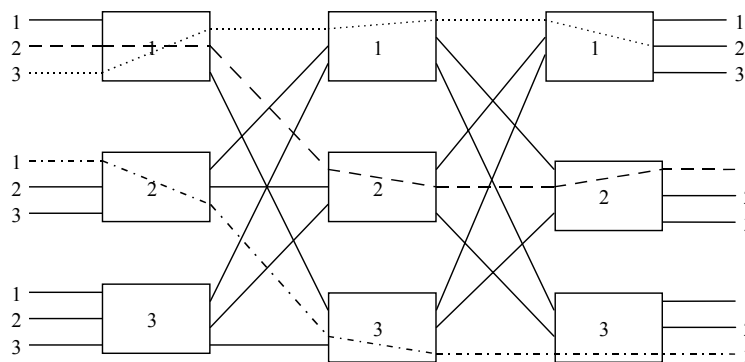


Figura 4.18 Matriz de comutação 9 x 9.

b) A Fig. 4.18 mostra também, uma situação em que pode haver bloqueio interno. As seguintes conexões estão em andamento: o enlace 3 da matriz básica 1 do 1º estágio está conectado ao enlace 2 da matriz básica 1 do 3º estágio; o enlace 2 da matriz básica 1 do 1º estágio com o enlace 1 da matriz básica 2 do 3º estágio e o enlace 1 da matriz básica 2 do 1º estágio com o enlace 3 da matriz básica 3 do 3º estágio.

Nestas condições, o enlace 1 da matriz básica 1 do 1º estágio e o enlace 1 (ou 2) da matriz básica 3 do 3º estágio, que estão livres, não poderão ser conectados, por falta de caminho no 2º estágio. Essa situação, em que dois enlaces de entrada e de saída estão livres e não podem

ser conectados por falta de caminho interno, é denominada de bloqueio interno. Esse bloqueio interno deve ser mantido o mais baixo possível, eventualmente próximo de zero.

No exemplo acima, houve o bloqueio interno por falta de caminho alternativo no 2º estágio. Pode-se aumentar o número de matrizes básicas no 2º estágio, para evitar a situação de bloqueio interno. A introdução de mais uma matriz básica no 2º estágio permite conectar os dois enlaces que estão bloqueados, mas continuaria a haver outras situações de bloqueio interno que são deixadas ao leitor descobrir.

Quantas matrizes básicas são necessárias no 2º estágio para garantir que a matriz de comutação de 3 estágios não tenha nenhuma situação de bloqueio interno?

Essa pergunta foi respondida por Clos em um artigo publicado em 1953 [1]. Clos analisou uma matriz de 3 estágios, considerando uma situação geral mostrada na Fig. 4.19.

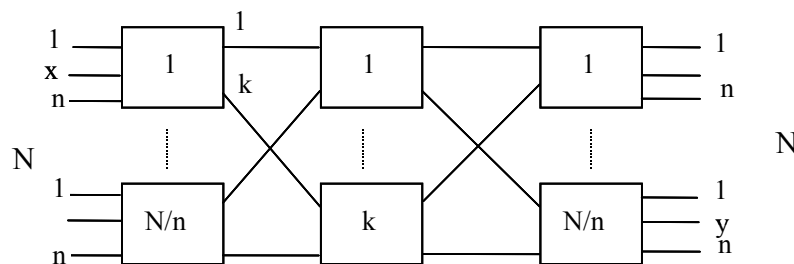


Figura 4.19 Matriz de 3 estágios N x N.

Clos raciocinou na situação de pior caso. Suponha que a entrada x queira se interligar com a saída y. As (n-1) entradas da matriz básica 1 do 1º estágio poderão estar ocupadas (em conversação), necessitando, portanto, no pior caso, (n-1) matrizes básicas no 2º estágio (cada conexão utilizando uma matriz básica diferente no 2º estágio). Por outro lado, as (n-1) saídas da matriz básica N/n do 3º estágio poderão estar ocupadas, necessitando também, no pior caso (n-1) matrizes básicas no 2º estágio.

Desse modo, para que a conexão entre x e y não seja bloqueada, necessita-se de (n-1) + (n-1) + 1 = 2n-1 matrizes básicas no 2º estágio. Isto é, a condição para uma matriz de 3 estágios ser estritamente sem bloqueio interno é que o número de matrizes básicas no 2º estágio seja k = 2n - 1.

O total de pontos de cruzamentos para uma matriz de 3 estágios sem bloqueio interno é dado por,

$$\begin{aligned}
 C_3(N, n) &= n(2n - 1) \frac{N}{n} + \frac{N}{n} \frac{N}{n} (2n - 1) + \frac{N}{n} n(2n - 1) \\
 &= (2n - 1) \left(2N + \frac{N^2}{n} \right)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Pode-se calcular o valor de n ótimo que minimiza o número de pontos de cruzamentos para uma matriz de 3 estágios e sem bloqueio interno. Adotam-se as seguintes suposições: n é uma variável contínua e muito maior que 1.

Para n >> 1, tem-se

$$C_3(N, n) \cong 4Nn + \frac{2N^2}{n} \quad (4.2)$$

Derivando a expressão acima em relação a n , e igualando a zero, obtém-se

$$\frac{dC_3(N, n)}{dn} = 4N - \frac{2N^2}{n^2} = 0 \Rightarrow n = \sqrt{\frac{N}{2}} \quad (4.3)$$

Substituindo o valor de n obtido na Eq. 4.3 na Eq. 4.1, tem-se

$$\begin{aligned} C_3(N) &= \left(2\sqrt{\frac{N}{2}} - 1\right) \left(2N + \frac{N^2}{\left(\sqrt{\frac{N}{2}}\right)^2}\right) \\ &= 4(\sqrt{2}N^{3/2} - N) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Um aspecto interessante é comparar o número de pontos de cruzamentos de uma matriz de 3 estágios utilizando a Eq. 4.4 com o número de pontos de cruzamentos de uma matriz com apenas um estágio. São considerados dois valores de N : 10 e 100.

$$\text{Para } N = 10 \Rightarrow \begin{cases} C_1(10) = 100 - 10 = 90 \\ C_3(10) = 178 - 40 = 138 \end{cases}$$

$$\text{Para } N = 100 \Rightarrow \begin{cases} C_1(100) = 10^4 - 100 = 9900 \\ C_3(100) = 5256 \end{cases}$$

Pode-se concluir pelos valores obtidos acima que, para valores de N pequeno, uma matriz de 1 estágio é mais vantajoso que matriz de 3 estágios sob o ponto de vista de número de pontos de cruzamentos. Entretanto, a partir de um certo valor de N , a matriz de 3 estágios se torna vantajoso.

Na Fig. 4.20, são mostradas as curvas dos números de pontos de cruzamentos em função de N , para matrizes de 1 e 3 estágios.

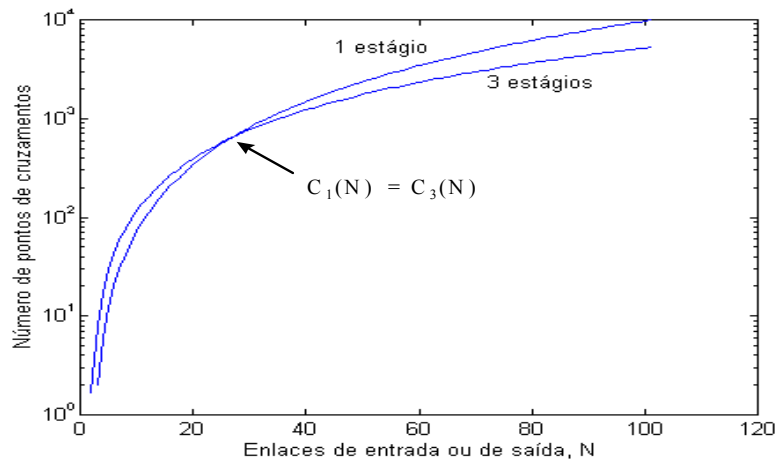


Figura 4.20 Número de pontos de cruzamentos em função de N , para matrizes de 1 e 3 estágios.

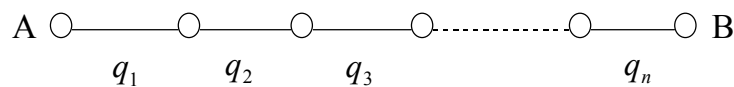
Conclui-se que, para valor de N em torno de 25, os números de pontos de cruzamentos para 1 e 3 estágios são iguais. Abaixo desse valor, a matriz de 1 estágio é mais vantajosa que a de 3 estágios e para valores acima, a de 3 estágios é mais vantajosa.

As duas estruturas de matriz até aqui estudadas são estritamente sem bloqueios internos. Para a matriz de 3 estágios, pode-se trabalhar com algum bloqueio interno, reduzindo o número de matrizes básicas no 2º estágio, mas mantendo a probabilidade de bloqueio bastante baixa. Isto significa que em algumas situações, não haverá um caminho entre um enlace de entrada e de saída, mas que devem ser eventos bastante raros.

Para análise de estruturas com bloqueios internos, utiliza-se o método apresentado por Lee [2], que se baseia na teoria do grafo.

Na teoria de grafo, os vários caminhos alternativos existentes para atingir um ponto de saída, a partir de um ponto de entrada, são representados por grafos. Resume-se a seguir alguns resultados da teoria de grafo que serão utilizados na análise.

A Fig. 4.21 mostra um grafo série.



q_i é a probabilidade de um enlace estar livre.

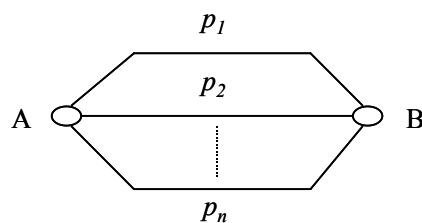
Figura 4.21 Grafo série.

Denominando de Q , a probabilidade do caminho entre A e B estar livre e de B a probabilidade do caminho entre A e B estar bloqueado, essas probabilidades são dadas por

$$Q = \prod_{i=1}^n q_i \quad (4.5)$$

$$B = 1 - Q$$

A Fig. 4.22 mostra um grafo paralelo.



$p_i = 1 - q_i$ é a probabilidade de um enlace estar bloqueado.

Figura 4.22 Grafo paralelo.

Neste caso, as probabilidades Q e B são dadas por

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i)$$

$$B = \prod_{i=1}^n (1 - q_i)$$
(4.6)

Em uma situação mais geral, têm-se grafos em série combinados com grafos em paralelo, como mostrado na Fig. 4.23.

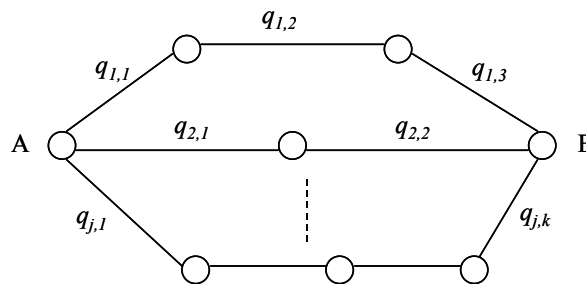


Figura 4.23 Grafo série e paralelo.

As probabilidades Q e B , neste caso, são dadas por

$$Q = 1 - \prod_j (1 - \prod_k q_{j,k})$$

$$B = \prod_j (1 - \prod_k q_{j,k})$$
(4.7)

O método de Lee representa os vários caminhos dentro de uma matriz de comutação por grafos. Para a aplicação do método, são consideradas somente as matrizes simétricas. Uma matriz simétrica é equivalente a matriz da Fig. 4.19. A primeira metade da matriz (1º e 2º estágios) tem a mesma construção da segunda metade (2º e 3º estágios).

Devido à simetria, basta analisar uma parte da matriz como mostrado na Fig. 4.24 (para uma matriz de 3 estágios).

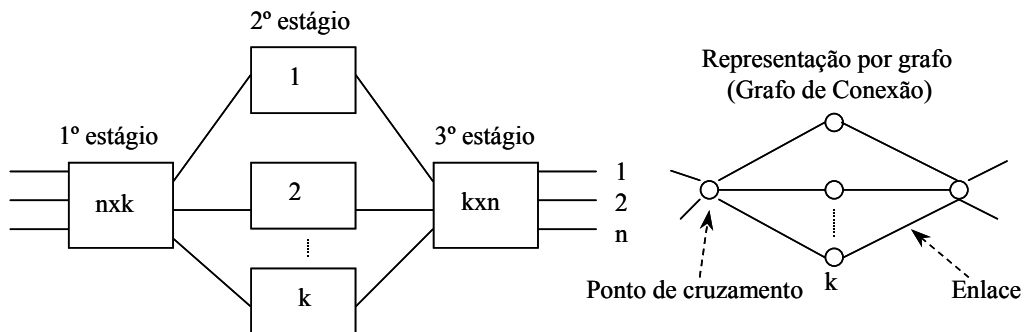


Figura 4.24 Representação de uma matriz de comutação por grafos.

Pode-se observar pela figura que na representação em grafo, um ponto de cruzamento representa um nó em grafo e um enlace na matriz representa um arco não direcionado. Essa representação permite utilizar os principais resultados obtidos na teoria de grafo.

Calcula-se, a seguir, a probabilidade de bloqueio para uma matriz de 3 estágios. O grafo equivalente de uma matriz (grafo de conexão) de 3 estágios é mostrado na Fig. 4.25. A probabilidade de um enlace estar livre é a mesma para todos os enlaces e vale q . O valor de p , neste caso, representa a probabilidade de ocupação de um enlace externo à matriz de comutação. O número de enlaces de entrada é n , e k representa o número de matrizes básicas do 2º estágio.

Pode-se calcular a probabilidade de bloqueio da matriz, utilizando a Eq. 4.7, e obtém-se

$$B = (1 - q^2)^k \quad (4.8)$$

Na Eq. 4.8, q^2 representa a probabilidade de um enlace série estar livre, $(1 - q^2)$ é a probabilidade de um enlace série estar bloqueado e $(1 - q^2)^k$ é a probabilidade de todos os enlaces séries estarem bloqueados.

Em termos práticos é mais fácil fazer estatísticas de utilização de um enlace externo. Assim, se p é a probabilidade de utilização (ou intensidade de tráfego representada em Erlangs), pode-se relacionar a enlace interno da matriz de comutação da seguinte maneira.

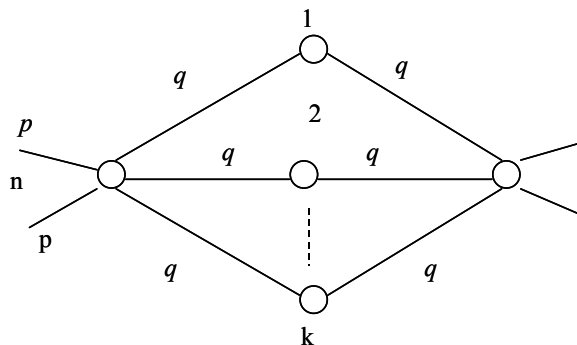


Figura 4.25 Grafo de conexão de uma matriz de 3 estágios.

Seja p a probabilidade de ocupação de um enlace de entrada. Suponha que a probabilidade de ocupação de um enlace na matriz seja independente do enlace de entrada. Então, a probabilidade de um enlace na matriz estar ocupado é dada por p / β , onde o fator $\beta = k/n$ é denominado de taxa de expansão espacial.

Assim, pode-se reescrever a Eq. 4.8.

$$q = 1 - p / \beta \quad \text{e} \quad B = [1 - (1 - p/\beta)^2]^k \quad (4.9)$$

Exemplo 4.2

Seja N o número de enlaces de entrada e de saída. Projete uma matriz de comutação que interligue qualquer um dos N enlaces de entrada com qualquer um dos enlaces de saída. A probabilidade de bloqueio deve ser menor ou igual a 0,007 e a utilização de um enlace de entrada é $p=0,7$. Suponha $N = 128$.

Solução:

Como o problema não especifica qual tipo de matriz deve se utilizar, podemos solucionar de várias maneiras.

A maneira mais simples, neste caso, é utilizar uma matriz quadrada, que tem probabilidade de bloqueio igual a zero, portanto satisfaz a condição de probabilidade de bloqueio solicitada. Entretanto, o número de pontos de cruzamentos é $N^2 - N = 16\ 256$, um valor grande que pode ser reduzido se for utilizada uma matriz de 3 estágios.

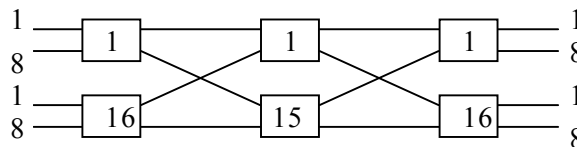
Com uma matriz de 3 estágios, pode-se resolver de dois modos.

a) Uma matriz sem bloqueio

Neste caso, podemos utilizar a Eq. 4.3 e calcular o valor de n,

$$n \cong \sqrt{\frac{N}{2}} = 8, \text{ e pela condição de Clos,}$$

$k = 2n - 1 = 15$ matrizes básicas no 2º estágio. Além disso, $N / n = 16$. Portanto, a matriz de 3 estágios ficará como mostrada na figura abaixo.



O total de pontos de cruzamentos é dado pela Eq. 4.4, $C_3(N) = 4(\sqrt{2}N^{1,5} - N) = 7680$ que é bem menor que o valor encontrado para uma matriz quadrada.

b) Uma matriz com bloqueio

Neste caso, os valores de n e N / n são iguais aos calculados em a). O valor de k deve ser tal que satisfaça a condição de bloqueio especificada no enunciado. Utilizando a Eq. 4.9, pode-se calcular a probabilidade de bloqueio para vários valores de k, como mostrado na tabela abaixo.

$$p = 0,7 \quad B \leq 0,007 \quad n = 8$$

$$B = [1 - (1 - p/\beta)^2]^k$$

k	8	10	12	13	14
B	0,470	0,116	0,018	0,0061	0,0019

↑ B < 0,007

O menor valor de k que satisfaz a condição do enunciado é igual a 13. Para esse valor, o total de pontos de cruzamentos é $C_{3,B}(N) = 2Nk + k(N/n)^2 = 6656$, um valor menor que matriz quadrada ou matriz de 3 estágios sem bloqueio. Esse número poderia ser diminuído ainda mais, se a probabilidade de bloqueio especificada fosse de 2%. Neste caso, são necessárias somente de 12 matrizes básicas no 2º estágio e o total de pontos de cruzamentos seria de 6144.

Existem muitas outras estruturas de matrizes de comutação que podem ser analisadas utilizando as técnicas apresentadas acima. O exercício 4.3 é um exemplo de estrutura em que a matriz de comutação é dividida em vários módulos.

Pode-se utilizar a mesma idéia de construção para 3 estágios, e estender para n estágios, como mostrado na Fig. 4.26. As estruturas com números ímpares de estágios são mais importantes, pois, fornecem mais caminhos alternativos. Uma estrutura com 5 estágios pode ser sem bloqueio interno se considerar que os 3 estágios internos, o 2º, o 3º e o 4º, formam uma matriz de comutação sem bloqueio obedecendo a condição de Clos, e se aplicar novamente a condição de Clos para a nova matriz de 3 estágios formada por 1º estágio, a matriz de 3 estágios internos e 5º estágio. O detalhamento dessa estrutura é apresentado no exercício 4.4. Essa idéia pode ser estendida para matrizes ímpares de 7 estágios e superiores.

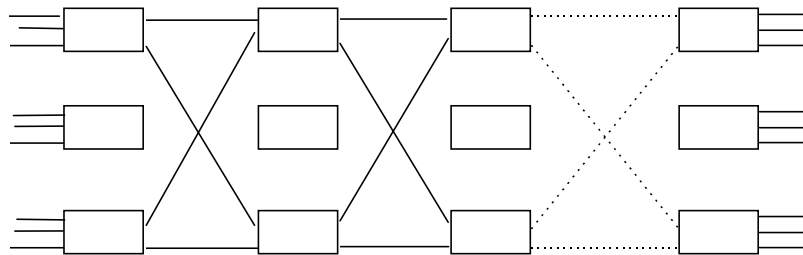


Figura 4.26 Matriz multiestágios.

As matrizes de comutação analisadas, nesta seção, possuem seus enlaces não multiplexados e foram projetadas para comutar sinais analógicos, e são denominadas de matrizes espaciais. Pode-se estender a teoria de análise das matrizes espaciais para as estruturas matriciais digitais. Para isso é necessário fazer a equivalência entre as matrizes espaciais e as matrizes digitais.

A matriz digital, como visto anteriormente, é uma composição de estágios temporais e estágios espaciais. Dessa maneira, pode-se fazer a equivalência separadamente. A equivalência entre um estágio temporal e uma matriz espacial é mostrada na Fig. 4.27.

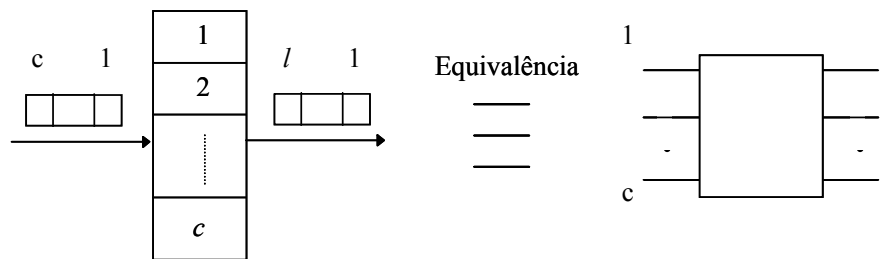


Figura 4.27 Equivalência entre um estágio temporal e uma matriz espacial.

Em um estágio temporal, os conteúdos de c canais multiplexados na entrada são armazenados seqüencialmente na memória de dados. A leitura dos conteúdos é feita em uma seqüência definida pela memória de controle. Essa leitura é feita, em geral, a uma velocidade maior do que a escrita, e que possibilita ter mais canais internos l ($l > c$). Esses l canais internos dão maior flexibilidade e diminuem situações de bloqueio interno. A leitura comandada pela memória de controle permite que o conteúdo de um canal de entrada possa ser comutado a qualquer um dos l canais internos. Portanto, um estágio temporal é equivalente a uma matriz espacial com c enlaces de entrada e l enlaces de saída, como mostrado na Fig. 4.27.

A equivalência entre um estágio espacial digital e uma matriz espacial pode ser estabelecida como mostrado na Fig. 4.28. A Fig. 4.28 mostra um estágio espacial digital com n enlaces de entrada, contendo l canais multiplexados por enlace e m enlaces de saída contendo l canais multiplexados por enlace. No caso de uma matriz espacial digital, o conteúdo de cada canal é comutado temporalmente para um dos canais de saída. Pode-se raciocinar que os n canais número 1 de todos os enlaces das entradas podem ter acesso a todos os m canais número 1 das saídas, representando assim, a matriz básica número 1 da Fig. 4.28. Os n canais número 2 de todos os enlaces das entradas podem ter acesso a todos os m canais número 2 das saídas e assim sucessivamente. Desse modo, a matriz espacial equivalente terá l matrizes básicas, cada uma tendo n enlaces de entrada e m enlaces de saída.

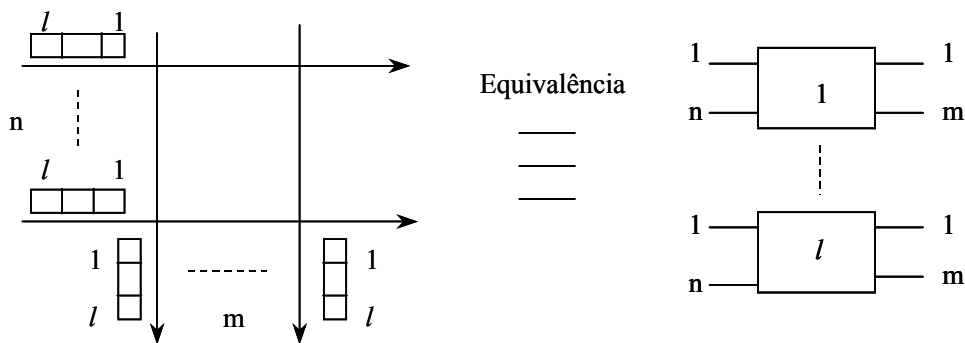
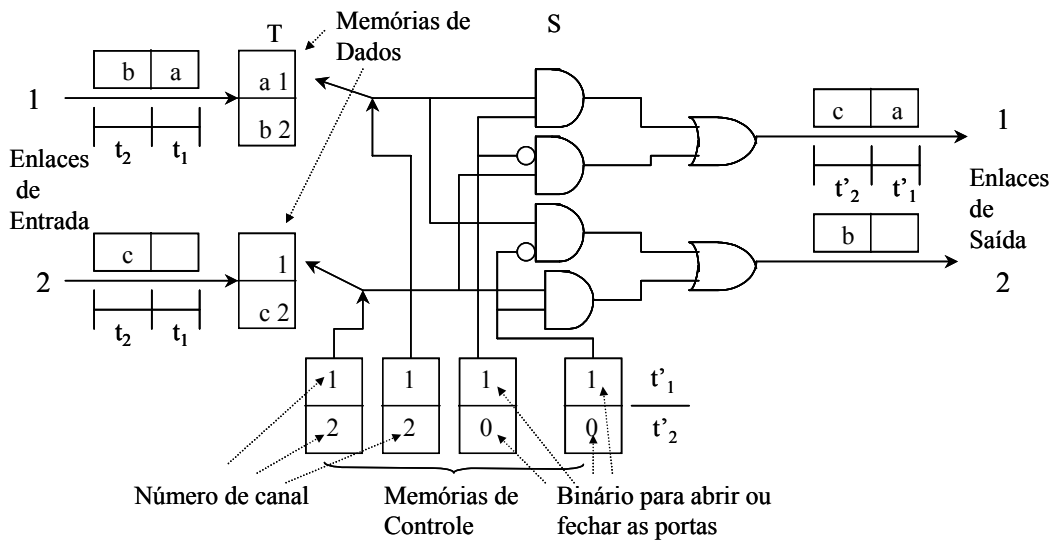


Figura 4.28 Equivalência entre estágio espacial digital e matriz espacial.

Exemplo 4.3

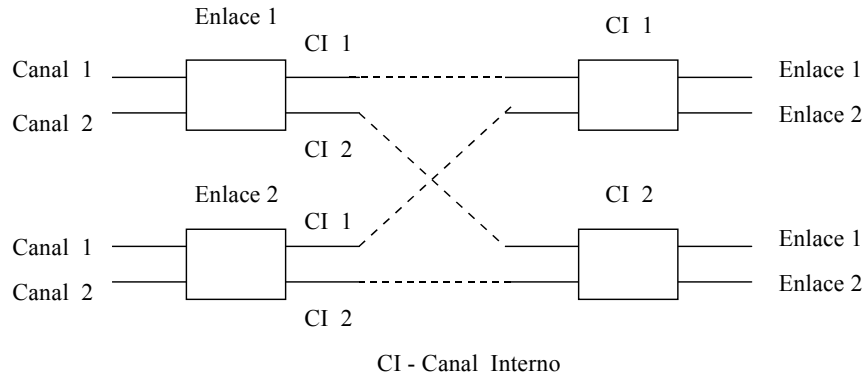
Para o comutador digital (TS) mostrado abaixo,

- a) Desenhe o equivalente espacial do comutador
- b) Desenhe o grafo de conexão e calcule a probabilidade de bloqueio supondo que a probabilidade de ocupação de um canal (time slot) de entrada seja $p = 0,8$.

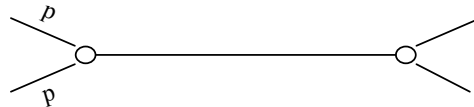


Solução:

a) Desenha-se, inicialmente, o equivalente espacial do estágio temporal e depois o equivalente do estágio espacial, como mostrado na figura abaixo. As interconexões são feitas de acordo com os relacionamentos existentes entre os canais internos.



b) O grafo de conexão será



Neste caso, não há expansão nos caminhos internos, mas uma compressão. Assim, a probabilidade de bloqueio será

$$B = 1 - q,$$

onde q é a probabilidade de um enlace interno estar livre. A probabilidade de um enlace interno estar livre é igual a probabilidade de os dois enlaces externos estarem livres, isto é,

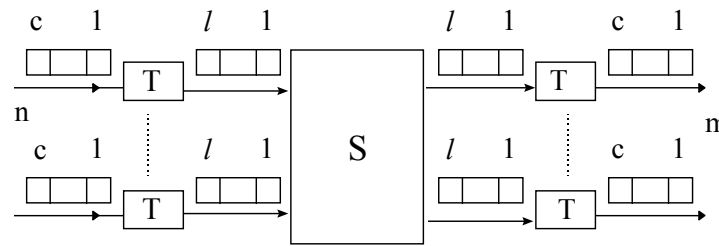
$$q = (1 - p).(1 - p) = 0,04$$

Portanto, $B = 0,96$.

Exemplo 4.4

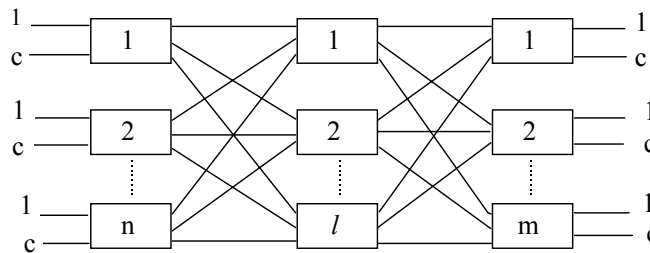
Para a matriz TST abaixo,

- a) Desenhe o equivalente espacial
- b) Qual é a relação entre l e c para que não haja bloqueio interno?
- c) Para a situação de bloqueio, calcule a probabilidade de bloqueio, supondo que a probabilidade de ocupação de um canal de entrada seja p .



Solução:

a) O equivalente espacial para a configuração TST é mostrado na figura abaixo.

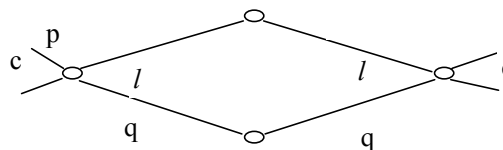


b) A condição de Clos para matriz de 3 estágios pode ser utilizada para se ter uma matriz estritamente sem bloqueio. Dessa maneira, deve-se ter $l = 2c - 1$.

Conclui-se que para uma central digital na configuração TST opere sem bloqueio, basta aumentar o número de canais internos, que é facilmente implementado, aumentando a frequência do relógio.

A relação $\alpha = \frac{l}{c}$ é denominada de expansão temporal. Se $c \gg 1$, então $\alpha \cong 2$, e é uma matriz sem bloqueio. Se $\alpha < 2$, significa que é uma matriz digital com bloqueio interno.

c) Na situação de bloqueio ($\alpha < 2$), podemos utilizar a técnica desenvolvida por Lee para calcular a probabilidade de bloqueio. A figura abaixo mostra o grafo de conexão de uma matriz de 3 estágios.



A probabilidade de bloqueio será

$$B = (1 - q^2)^l \tag{4.10}$$

Mas, $\alpha = l / c$ e $p =$ probabilidade de ocupação de um canal de entrada. Substituindo esses valores na Eq. 4.10, obtém,

$$B = [1 - (1 - p / \alpha)^2]^l \tag{4.11}$$

Exemplo 4.5

Para o exemplo 4.4, considere $c = 5$ e 30 canais. Refaça o item b).

Solução:

O valor de l para não haver bloqueio é $l = 2c - 1$

Para $c = 5$, tem-se $l = 9$, e para $c = 30$, $l = 59$. Ou seja, aproximadamente o dobro do número de canais do enlace externo (enlace PCM).

Supondo que a probabilidade de ocupação de um canal de enlace de entrada seja $p = 0,8$, pode-se calcular a probabilidade de bloqueio pela fórmula de Lee. Espera-se que esse cálculo de probabilidade seja zero, pois, será utilizada a condição de Clos.

Para $c = 5$,

$$B = [1 - (1 - 0,8 / 1,9667)^2]^9 = 0,0202, e$$

para $c = 30$,

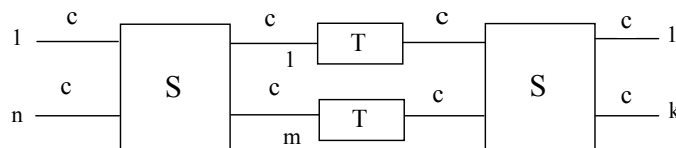
$$B = [1 - (1 - 0,8 / 1,9667)^2]^{59} = 7,7 \times 10^{-12}$$

As duas probabilidades calculadas não são zeros! Essa aparente contradição pode ser explicada pelo fato do método de Lee ser uma fórmula aproximada. O método de Lee leva em conta que os enlaces que interligam os estágios são todos independentes. Assim, para valores de c pequenos, a dependência entre os enlaces é maior e apresenta erros maiores ($c = 5$). Para valores de c grandes, essa dependência diminui e os erros são menores, e a fórmula se aproxima do valor exato ($c = 30$).

Exemplo 4.6

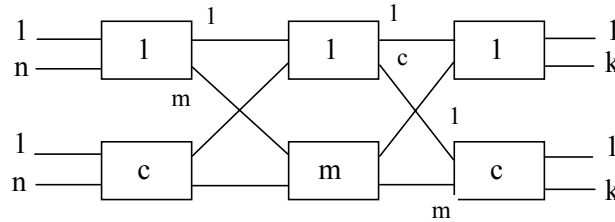
Para a matriz STS abaixo,

- Desenhe o equivalente espacial
- Qual é a condição para que não haja bloqueio interno?
- Para a situação de bloqueio, calcule a probabilidade de bloqueio supondo que a probabilidade de ocupação de um canal de entrada seja p .



Solução:

- O equivalente espacial é mostrado na figura abaixo. Observe que, neste caso, também, obteve-se uma matriz espacial de 3 estágios.



b) Embora seja uma matriz espacial de 3 estágios, para calcular a condição de estritamente sem bloqueio, deve-se observar que o número de enlaces de entrada é diferente do número de enlaces de saída. Neste caso, a condição de não bloqueio é dada por

$$m = n - 1 + k - 1 + 1 = n + k - 1$$

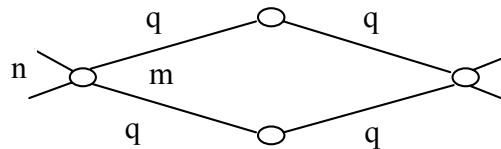
$$m = n + k - 1$$

Se $n = k \Rightarrow m = 2n - 1$

Lembre-se que, neste caso, m representa o número de estágios temporais. Portanto, esta estrutura não é muito flexível para trabalhar sem bloqueio, pois, ao contrário da estrutura TST que basta aumentar a frequência do relógio, nesta estrutura é necessário aumentar o número de estágios temporais.

Esta estrutura, entretanto, utiliza menos memória que a estrutura TST, e foi considerada para projetos de centrais de comutação, quando o custo da memória era alto.

c) Para a situação em que $m < n + k - 1$, tem-se bloqueio interno, e a probabilidade desse bloqueio pode ser calculada pelo método de Lee. O grafo de conexão é mostrado na figura abaixo.



A probabilidade de bloqueio será

$$B = (1 - q^2)^m$$

Para $\alpha = m / n$ e $p =$ probabilidade de ocupação de um canal de entrada, obtém-se

$$B = [1 - (1 - p / \alpha)^2]^m$$

4.5 Exemplo de uma Central Digital Comercial: Trópico RA

A central Trópico RA, é uma central comercial que foi desenvolvida pelo CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebrás (atualmente, Fundação CPqD) em parceria com os fabricantes de equipamentos de telecomunicações. É uma central projetada e desenvolvida com tecnologia totalmente brasileira e atualmente em operação em várias concessionárias de telecomunicações com bastante sucesso.

Uma central deve ter bastante flexibilidade e um crescimento modular. Isso garante ao comprador, um investimento inicial moderado e possibilidade de ampliação futura sem necessidade de adquirir uma nova central. A Trópico RA tem uma arquitetura bastante modular. Os principais módulos da central Trópico RA são: MX - módulo de comutação, MS - módulo de sincronismo, MZ - módulo de sinalização, M0 - módulo de operação e manutenção, MA - módulo auxiliar, MT - módulo de terminais e MI - módulo integrado. O funcionamento de cada módulo e o inter-relacionamento entre esses módulos são bastante complexos e estão fora dos objetivos desse capítulo. O conceito a ser detalhado é, essencialmente, em relação a estrutura da matriz de comutação da Trópico RA. Outros detalhes poderão ser consultados na referência [3].

O conceito essencial da matriz de comutação da central Trópico RA é mostrado na Fig. 4.29. A figura mostra somente um sentido de transmissão. As várias linhas digitais, após o módulo de terminais que neste caso é apenas um concentrador, são multiplexadas em enlace de alta velocidade. Os canais do enlace de alta velocidade são comutados em uma matriz de comutação constituída essencialmente de estágio temporal, como explicado no exemplo da Fig. 4.6. A extensão desse conceito, para aplicações em centrais de grande porte, exige bastante engenhosidade e criatividade. Descreve-se, a seguir, como a Trópico RA cresce em módulos para se tornar uma central de grande porte.

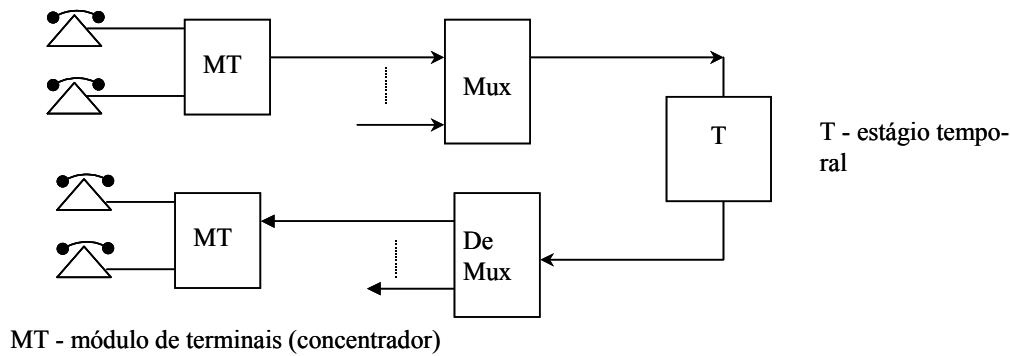


Figura 4.29 Conceito essencial da central Trópico RA.

Descreve-se, inicialmente, a estrutura do módulo de terminais, MT. A Fig. 4.30 mostra a estrutura do módulo de terminais.

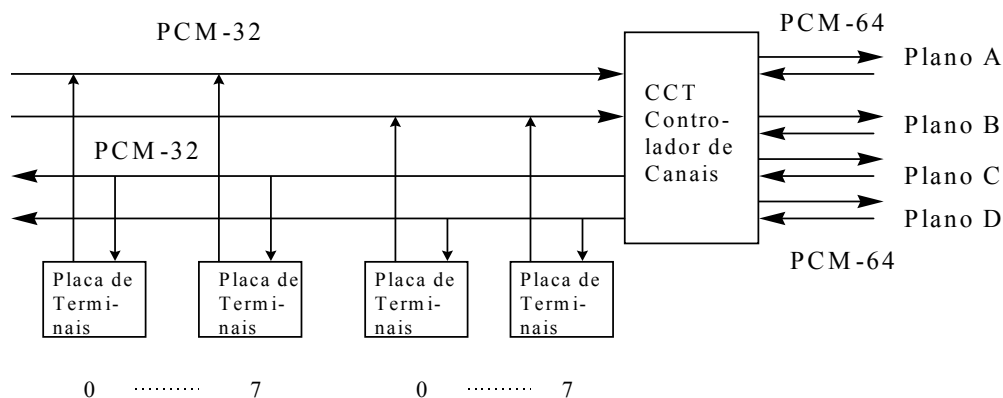


Figura 4.30 Estrutura do módulo de terminais, MT.

Cada placa de terminais pode acomodar até 16 terminais. São utilizados quatro enlaces PCM-32, dois para transmissão e dois para recepção. Podem ser acomodados até oito placas de terminais em um par (transmissão e recepção) de enlaces PCM. Portanto, um módulo de terminais pode acomodar até $2 \times 8 \times 16 = 256$ terminais. Os canais de dois enlaces PCM-32 são multiplexados através do controlador de canais (CCT) e podem ocupar qualquer um dos canais dos enlaces PCM de 64 canais dos 4 planos. Um plano é constituído de módulos de comutação, de sincronismo e de sinalização. O conceito de planos é utilizado para possibilitar um crescimento modular e ter maior confiabilidade em caso de ocorrência de falhas em um plano. Para centrais de pequeno porte, somente um plano é suficiente. Para porte maior, outros planos poderão ser utilizados. Quando a central opera com vários planos, a confiabilidade é maior, pois mesmo que haja falha em um plano, outros planos continuariam operando e não haveria uma parada total da central.

A operação em um plano é explicada a seguir.

Uma placa comutadora DXD é constituída de 4 estágios temporais, configurados como mostrado na Fig. 4.31. Os 8 módulos de terminais são multiplexados, através do bloco SPS - conversor série-paralelo-série, em um enlace PCM de 512 canais. Cada placa comutadora DXD pode receber 2 enlaces de 512 canais. O controle de escrita e de leitura nos estágios temporais, é feito através de uma outra placa, não mostrada na figura.

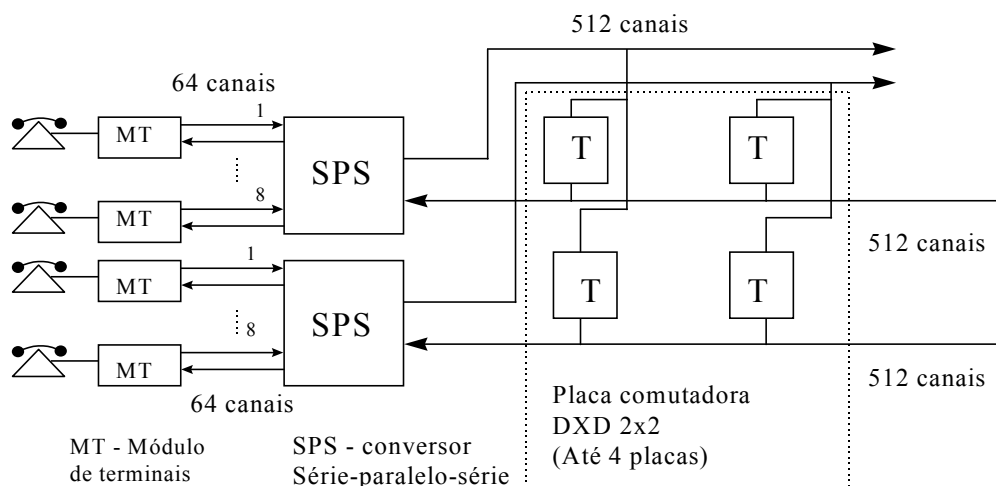


Figura 4.31 Operação em um plano.

O crescimento modular em um plano é feito utilizando as placas DXD, interconectadas como mostrado na Fig. 4.32. Um enlace de 512 canais do módulo MX0 entra em uma placa DXD do próprio módulo e também em placa DXD do módulo MX1. Assim, a leitura e a escrita dos 512 canais nos estágios temporais são feitas em paralelo, neste caso, em dois módulos.

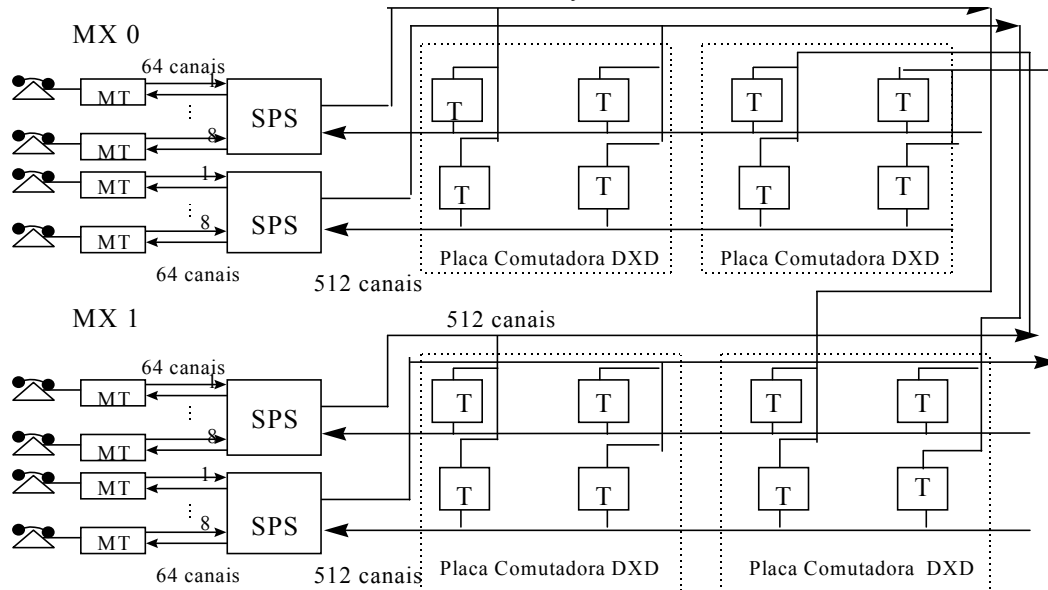


Figura 4.32 Crescimento modular em um plano.

Um plano pode acomodar até 4 placas comutadoras DXD, significando um crescimento de até 4 MXs. Portanto, um plano pode acomodar até $16 \times 256 \times 4 = 16\,384$ terminais. Utilizando 4 planos, pode-se acomodar até $16\,384 \times 4 = 65\,536$ terminais.

A Trópico RA possui uma outra versão da placa DXD, a QXD que possibilita uma expansão até 8 MXs. A estrutura é a mesma da DXD, mas a QXD recebe 4 enlaces multiplexados de 512 canais e possui 8 estágios temporais. Assim, a capacidade máxima da central Trópico RA é de 131 072 terminais, que corresponde a uma central de grande porte.

REFERÊNCIAS

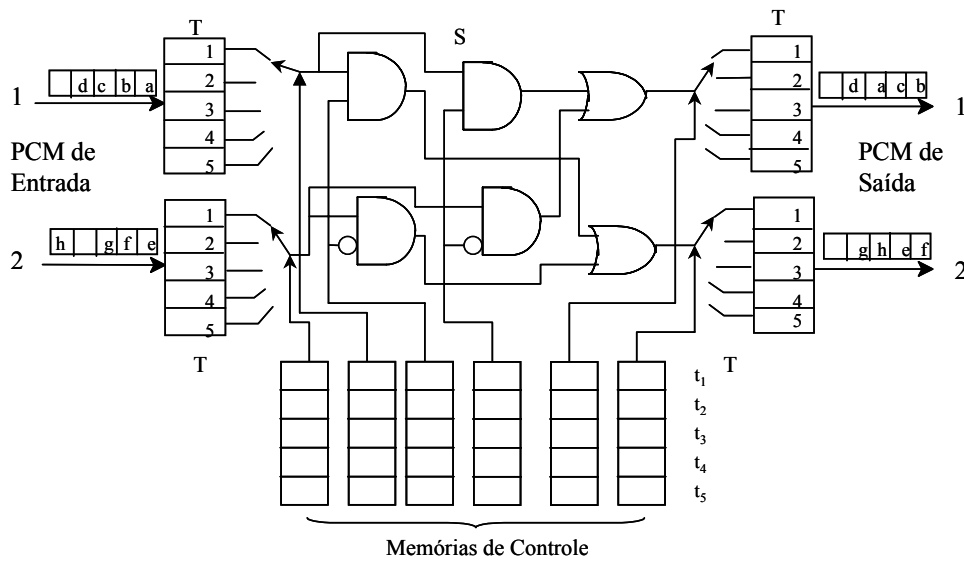
1. Clos, C., "A Study of Non-Blocking Switching Networks", Bell System Technical Journal, Vol. 32, pp. 406-424, March 1953.
2. Lee, C. Y., "Analysis of Switching Networks", Bell System Technical Journal, Vol. 34, pp. 1287-1315, November 1955.
3. Telebrás, "Trópico RA - Uma Plataforma Multiaplicação de Arquitetura Aberta e Modular", Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CPqD, Dezembro de 1997.

EXERCÍCIOS

4.1 Seja o comutador digital TST mostrado abaixo.

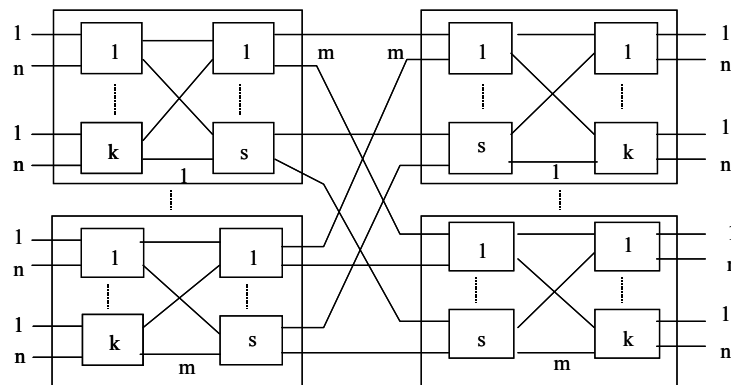
a) Preencha as posições das memórias (de dados e de controle) para que se tenha uma correta comutação de canais.

b) Suponha que um novo terminal telefônico que está no enlace 1 de entrada queira se comunicar com o outro terminal que está no enlace 2 de saída. É possível essa comunicação? Porquê?



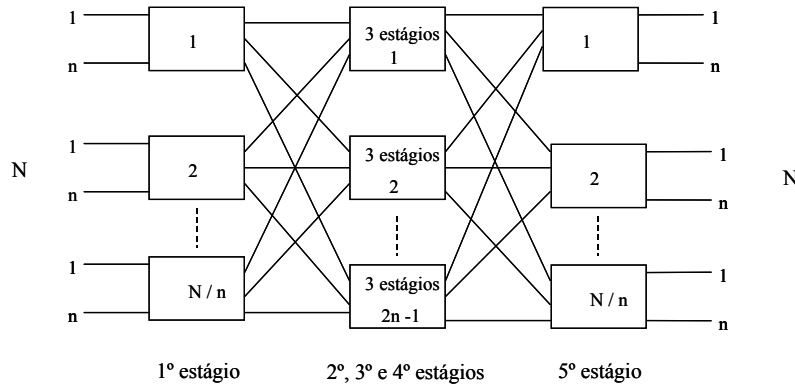
4.2 Seja a matriz de comutação espacial da figura abaixo.

- Desenhe o grafo de conexão da matriz.
- Calcule a probabilidade de bloqueio, supondo que a probabilidade de um enlace de entrada estar ocupado é p .



4.3 Uma matriz de comutação espacial de 5 estágios sem bloqueio pode ser construída a partir de uma matriz de 3 estágios sem bloqueio, conforme a figura abaixo.

- Calcule o número de pontos de cruzamentos para a matriz de 3 estágios em função dos parâmetros dados.
- Calcule o número total de pontos de cruzamentos para a matriz de 5 estágios.



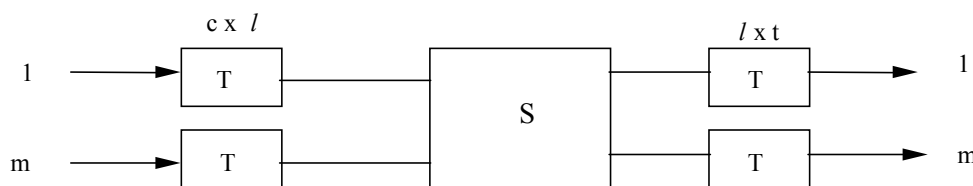
4.4 Para uma matriz de comutação espacial, $N \times N$, com $N = 72$, calcular o total mínimo de pontos de cruzamentos, considerando uma matriz de

- 1 estágio.
- 3 estágios (sem bloqueio).
- Desenhe a configuração da matriz do item b), com os parâmetros otimizados.
- Compare os resultados obtidos e comente.

4.5 Seja a matriz de comutação mostrada na figura abaixo.

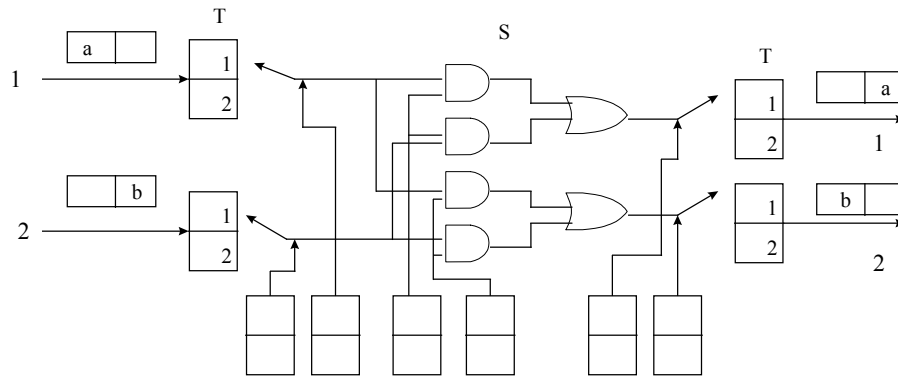
Para $l = c = t = m = 3$

- Desenhe o equivalente espacial da matriz e o grafo de conexão.
- Mostre uma situação em que um canal de entrada não possa se interligar com um canal de saída (bloqueio interno)
- Calcule a probabilidade de bloqueio supondo que a probabilidade de ocupação de um canal de entrada seja $p = 0,6$.
- Qual é o valor de l para que não haja bloqueio interno?
- Para o valor de l calculado no item d) calcular a probabilidade de bloqueio pelo método de Lee e comente.
- Se $t = 4$, qual é o valor de l para que não haja bloqueio interno?



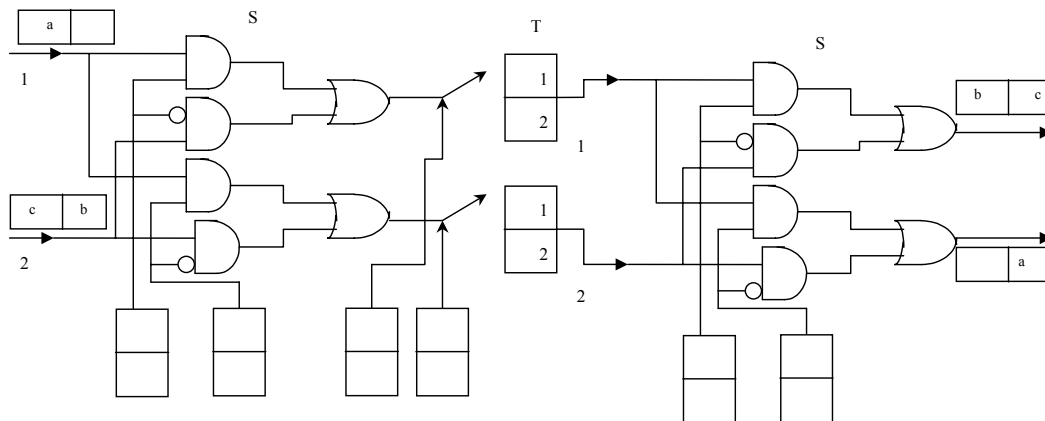
4.6 Seja o comutador digital TST mostrado abaixo.

- Preencha as posições das memórias (de dados e de controle) para que se tenha uma correta comutação de canais.
- Calcule o número de canais na matriz espacial para não haver bloqueio interno.
- Desenhe o grafo de conexão e calcule a probabilidade de bloqueio pelo método de Lee, para o item b) e comente.



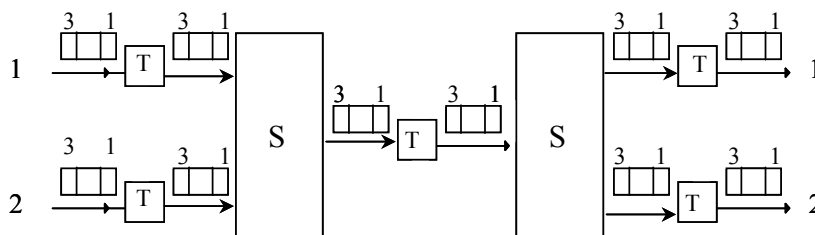
4.7 Seja a matriz de comutação mostrada abaixo.

- Preencha as posições das memórias de dados e de controle para que se tenha uma correta comutação de canais.
- Desenhe o equivalente espacial.
- Mostre uma situação de bloqueio.
- Calcule a probabilidade de bloqueio, supondo a probabilidade de ocupação de um canal de entrada seja p
- Qual é condição para não haver bloqueio interno?



4.8 Seja a matriz digital abaixo.

- Desenhe o equivalente espacial.
- Desenhe o grafo de conexão.
- Calcule a probabilidade de bloqueio, supondo que a probabilidade de ocupação de um canal de entrada seja $p = 0,8$.

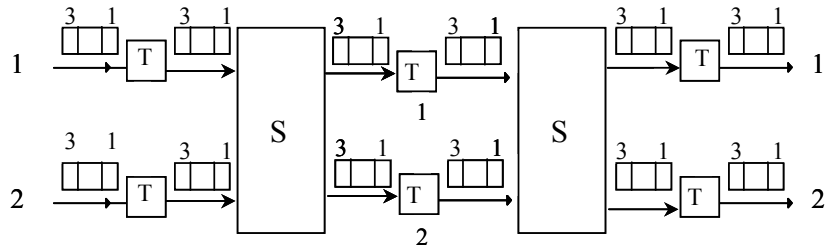


4.9 Seja a matriz digital abaixo.

- Desenhe o equivalente espacial.

b) Desenhe o grafo de conexão.

c) Calcule a probabilidade de bloqueio, supondo que a probabilidade de ocupação de um canal de entrada seja $p = 0,8$.



4.10 Os tempos de escrita e leitura na memória do estágio temporal são proporcionais aos números de MX da central Trópico RA?

4.11 Desenhe em detalhes a configuração de um módulo de comutação MX da Trópico RA que utiliza uma placa QXD.