

ORGANIZAÇÃO E ARQUITETURA DE COMPUTADORES

Topologias de Arquiteturas de Comunicação

**Alexandre Amory
Edson Moreno**

Índice

1. Introdução

2. Topologias

3. Exercícios

Topologias de Infra-estruturas de Comunicação

- **Objetivo**
 - Prover a funcionalidade de comunicação desejada para o sistema. E.g. onde colocar um servidor de impressão, visto que metade das máquinas deseja utilizá-lo, e o fluxo de informação é muito grande?
- **Topologia física**
 - É a forma com que nodos e conexões estão organizados
 - É uma informação estrutural do sistema
- **Topologia lógica**
 - É a forma como os sinais trafegam sobre a topologia física
 - É uma informação comportamental do sistema
- **Fatores decisivos na escolha da topologia**
 - Relação custo/desempenho
 - Adequação aos requisitos da aplicação
 - No caso ideal, a interconexão da topologia corresponde exatamente ao padrão de comunicação da aplicação
 - Exemplo: árvore binária favorece algoritmos de divisão e conquista

Topologias de Infra-estruturas de Comunicação

- **Critérios básicos para avaliação de topologias**
 - Complexidade de conexões
 - Número total de ligações entre componentes
 - Grau do nó
 - Número de ligações diretas que cada componente possui
 - Diâmetro
 - Maior distância entre dois componentes
 - Escalabilidade
 - Capacidade da rede interligar novos componentes mantendo as características originais da rede
 - Desempenho
 - Capacidade e velocidade de transferir informações
 - Indicadores são vazão e latência
 - Redundância
 - Existência de caminhos alternativos que permitem novos caminhos para as mensagens em caso de falha ou congestionamento

Índice

1. Introdução

2. Topologias

3. Exercícios

Redes Linear

- **Característica**
 - Cada máquina é diretamente a uma ou duas máquinas
 - Rede estática, ponto a ponto, espacial
 - Escalabilidade alta, embora grande número de nodos acarrete baixo desempenho
- **Grau**
 - 2 (nas pontas) ou 4 (demais) → todas as conexões são bidirecionais
- **Diâmetro**
 - $n - 1$ (n é o número de nós)
- **Número de conexões**
 - $2 \times (n - 1)$
- **Comunicação**
 - Em geral lenta → depende muito do mapeamento de tarefas nos nós
- **Redundância de comunicação**
 - Muito baixa → a quebra de apenas uma conexão já particiona a rede



Rede Totalmente Conectada

- **Característica**

- Cada nodo é diretamente conectado com todos os demais
- Rede estática, ponto a ponto, espacial
- Escalabilidade muito reduzida devido ao grau dos nodos

- **Grau**

$$2 \times (n - 1)$$

- **Diâmetro**

$$1$$

- **Número de conexões**

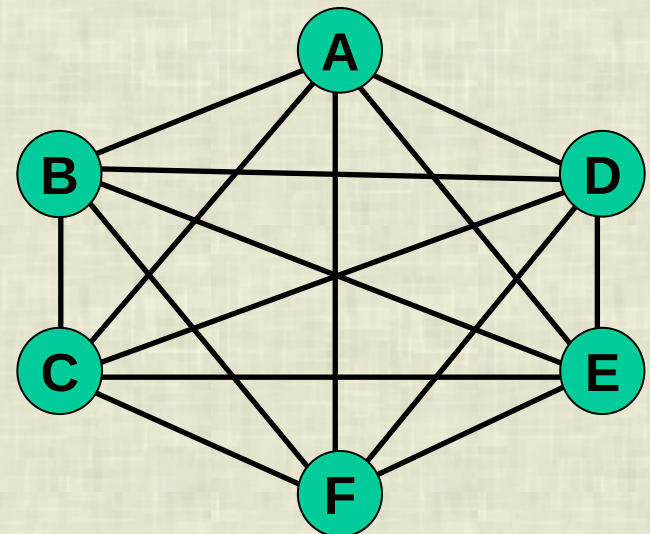
$$2 \times C_n^2 \quad \text{ou} \quad n^2 - n$$

- **Comunicação**

- Muito rápida → somente uma conexão

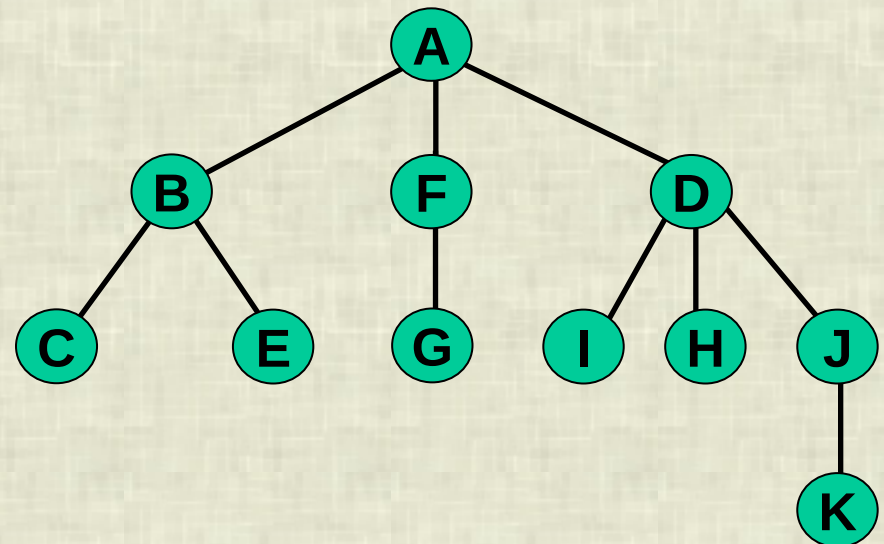
- **Redundância de comunicação**

- Muito alta → muitas *conexões* precisam falhar para o sistema ser particionado em subsistemas não comunicantes



Rede Hierárquica

- **Característica**
 - Nodos são organizados como uma árvore
 - Rede estática, ponto a ponto, espacial
 - Configuração comum para redes corporativas: escritórios individuais são conectados ao escritório principal
 - Escalabilidade limitada em largura, mas livre em profundidade
- **Comunicação**
 - Direta entre pais e filhos
 - Demais comunicações exigem máquinas intermediárias
- **Redundância de comunicação**
 - Falha de um pai implica particionamento da rede



Árvores Binárias

- **Característica**

- Cada nodo pai está conectado a exatamente dois nodos filhos
- Rede estática, ponto a ponto, espacial
- Escalabilidade alta, embora aumento da profundidade reduza o desempenho da rede

- **Grau**

2 (folhas), 4 (raíz) ou 6 (demais nodos)

- **Diâmetro**

Diâmetro cresce de forma linear em relação à altura da árvore

Diâmetro cresce de forma logarítmica em relação ao número de nós

$2 \times \log_2(n + 1) - 2$ (para árvores binárias completas)

- **Número de conexões**

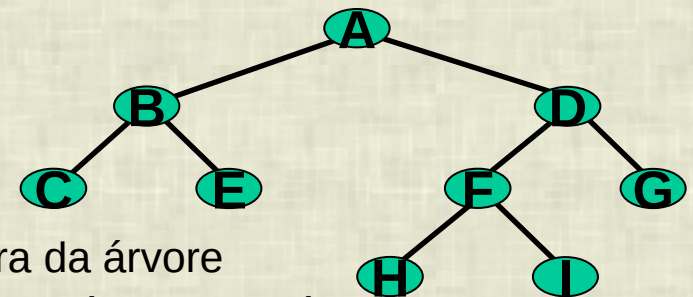
$2 \times (n - 1)$

- **Comunicação**

- Todo fluxo de dados entre a sub-árvore esquerda e direita passa pela raiz (gargalo da rede) → Inadequada para muitas aplicações

- **Redundância de comunicação**

- Muito baixa → Falha de um nodo resulta perda da ligação com toda a sub-árvore abaixo



Rede Estrela

- **Característica**

- Um nodo se conecta a todos os demais. Não existe qualquer outra conexão entre os demais nodos
- Rede estática, ponto a ponto, espacial
- Número de nodos limitado pelo nodo central
- Fácil de colocar novas conexões e modificar conexões existentes
- Escalabilidade baixa → limitada pelo nodo central

- **Grau**

$2 \times (n - 1)$ (raiz) e 2 (demais nodos)

- **Diâmetro**

1 ou 2

- **Número de conexões**

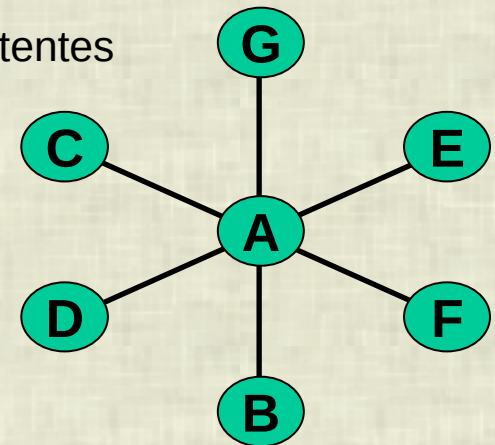
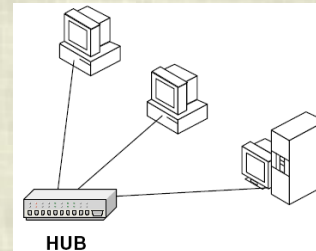
$2 \times (n - 1)$

- **Comunicação**

- Toda comunicação tem apenas e sempre um nodo intermediário (nodo central). **Esse esquema de transferência não garante rapidez visto que o nodo central pode estar sobrecarregado**

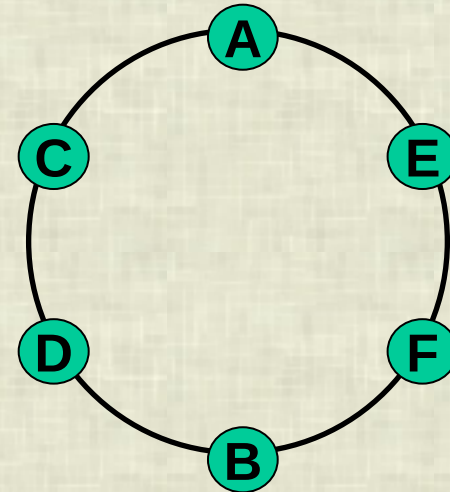
- **Redundância de comunicação**

- Quebra em uma única conexão afetará apenas nodo a ela conectado
- Quebra de nodo central derruba toda rede
- Usualmente confiável



Rede Anel

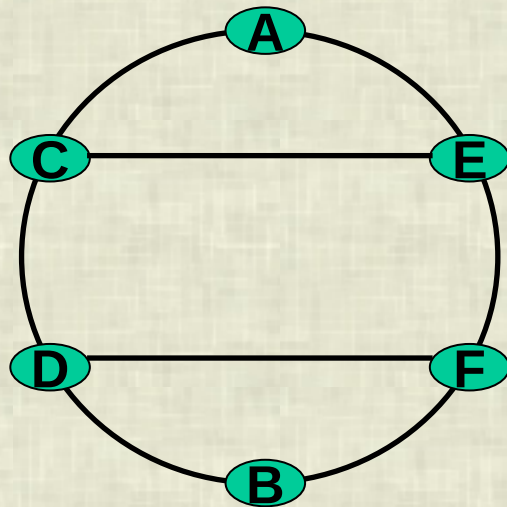
- **Característica**
 - Cada nodo é sempre conectado a exatamente outros dois nodos
 - Rede estática, ponto a ponto, espacial
 - Alta escalabilidade embora comprometa o desempenho da rede
- **Grau**
 - 2 (unidirecional), 4 (bidirecional)
- **Diâmetro**
 - $n / 2$ (bidirecional)
 - $n - 1$ (unidirecional)
- **Número de conexões**
 - n (unidirecional), $2 \times n$ (bidirecional)
- **Comunicação**
 - Unidirecional
 - Uma conexão é de entrada e outra é de saída. Quebra de uma conexão derruba rede
 - Bidirecional
 - cada nodo pode transmitir informação para ambos vizinhos. Suporta quebra de uma conexão. Quebra de mais de uma conexão particiona a rede



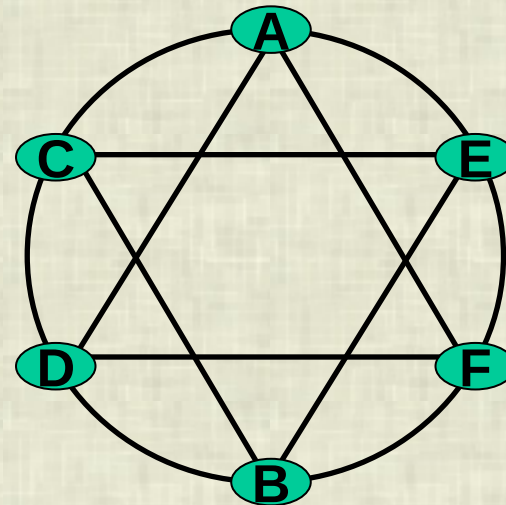
Rede Anel (Outras topologias)

- **Características**

- Nós podem ter mais de duas conexões
- Redes estáticas, ponto a ponto, espaciais
- Redundância e custos da comunicação aumentam com o número de cordas
- Escalabilidade menor que a rede anel simples → dependente do número de cordas



Anel Duplo



Anel Chordal

Malha 2D

- **Característica**

- Nodos se conectam de forma a gerar uma forma matricial
- Rede estática ou dinâmica (com roteadores), ponto a ponto, espaço-temporal
- Alta escalabilidade
- Aplicadas em áreas que requerem um grande poder de processamento

- **Grau**

4, 6 e 8 (todos os nodos centrais)

- **Diâmetro**

$2 \times (\text{sqrt}(n) - 1)$

- **Número de conexões**

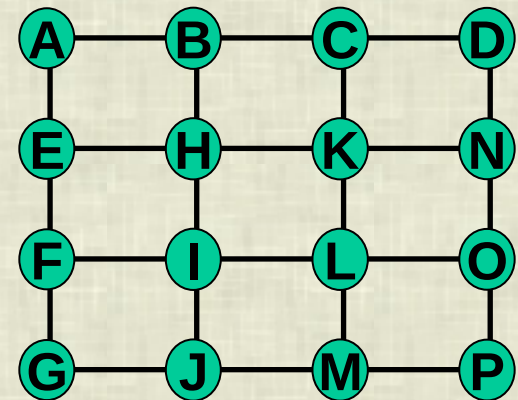
$4 \times (n - \text{sqrt}(n))$

- **Comunicação**

- Existência de caminhos alternativos entre nós aumenta confiabilidade e diminui risco de gargalos

- **Redundância de comunicação**

- A rede tem que quebrar em vários pontos para ser particionada



Toro Dobrado 2D

- **Característica**

- Nós se conectam de forma a gerar uma forma matricial com comunicação entre os limites da matriz
- Rede estática ou dinâmica (com roteadores), ponto a ponto, espaço-temporal
- Alta escalabilidade
- Aplicadas em áreas que requerem um grande poder de processamento

- **Grau**

8

- **Diâmetro**

$\sqrt{n} - 1$

- **Número de conexões**

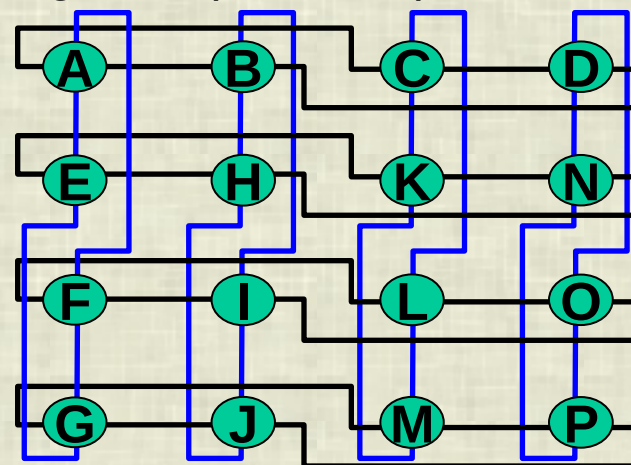
$4 \times n$

- **Comunicação**

- Existência de caminhos alternativos entre nós aumenta confiabilidade e diminui risco de gargalos

- **Redundância de comunicação**

- A rede tem que quebrar em vários pontos para ser particionada



Hipercubo 3D

- **Característica**

- Cada nodo se conecta a exatamente outros três, formando um cubo
- Rede estática ou dinâmica (com roteadores), ponto a ponto, espaço-temporal
- Não escalável

- **Grau**

6

- **Diâmetro**

$$\log_2(n) = 3$$

- **Número de conexões**

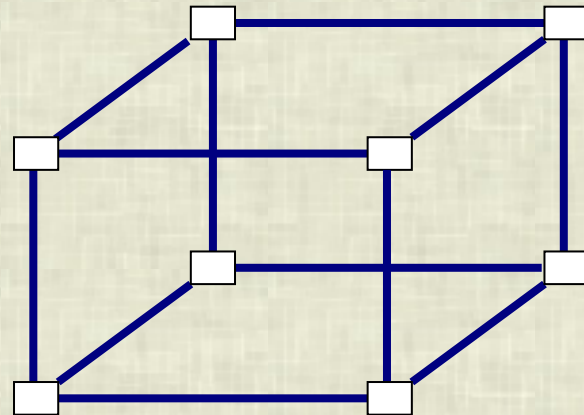
$$3 \times n = 24$$

- **Comunicação**

- Estrutura adequada para comunicações entre máquinas que requerem alto paralelismo

- **Redundância de comunicação**

- Muito alta → diversas conexões tem que quebrar para particionar a rede



Hipercubo 4D

- **Característica**

- Cada nodo se conecta a exatamente outros quatro, formando cubos totalmente conectados
- Rede estática ou dinâmica (com roteadores), ponto a ponto, espaço-temporal
- Não escalável

- **Grau**

8

- **Diâmetro**

$$\text{sqrt}(n) = 4$$

- **Número de conexões**

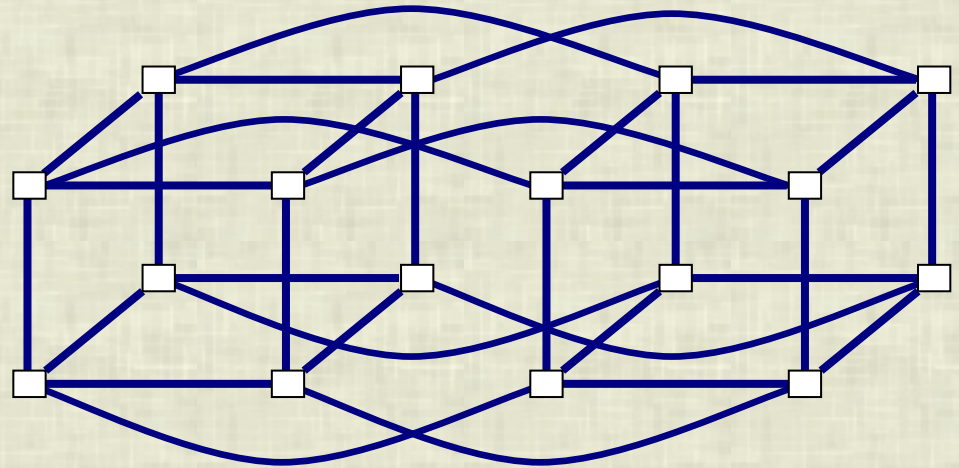
$$4 \times n = 64$$

- **Comunicação**

- Estrutura adequada para comunicações entre máquinas que requerem alto paralelismo

- **Redundância de comunicação**

- Muito alta → diversas conexões tem que quebrar para particionar a rede



Barramento

- **Característica**

- Todos os nodos estão diretamente conectados a meio físico compartilhado
- Rede dinâmica, multiponto, temporal
- Escalabilidade reduzida a uma centena de nodos
 - Utilizado em multiprocessadores com número moderado de nodos (< 100)
 - Comprimento do meio físico e número máximo de nodos determinado pela atenuação do sinal e pela qualidade da interface de HW (entre nodo e meio físico)

- **Grau**

2

- **Diâmetro**

1

- **Número de conexões**

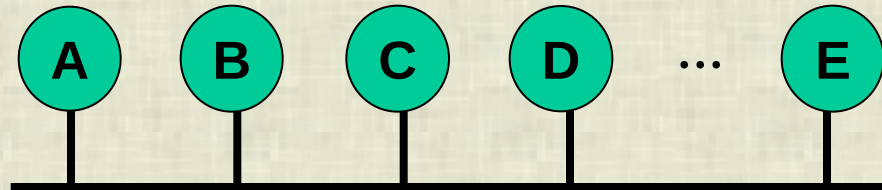
1

- **Comunicação**

- Nodos se comunicam diretamente através do barramento compartilhado
- Problema de sobrecarga do barramento

- **Redundância de comunicação**

- Falha em conexão local não afeta a rede
- Falha no barramento o problema em alguma interface bloqueia o funcionamento de todo o sistema



Barramento Segmentado

- **Característica**

- Todos os nodos estão diretamente conectados a meios físicos compartilhados e estes meios físicos podem estar conectados
- Rede estática (ligação entre segmentos) e dinâmica (em cada segmento), ponto-a-ponto (ligação entre segmentos) e multiponto (em cada segmento), espaço-temporal
- Escalabilidade reduzida a uma centena de nodos por segmento

- **Grau**

2

- **Diâmetro**

Dependente do número de segmentos

- **Número de conexões**

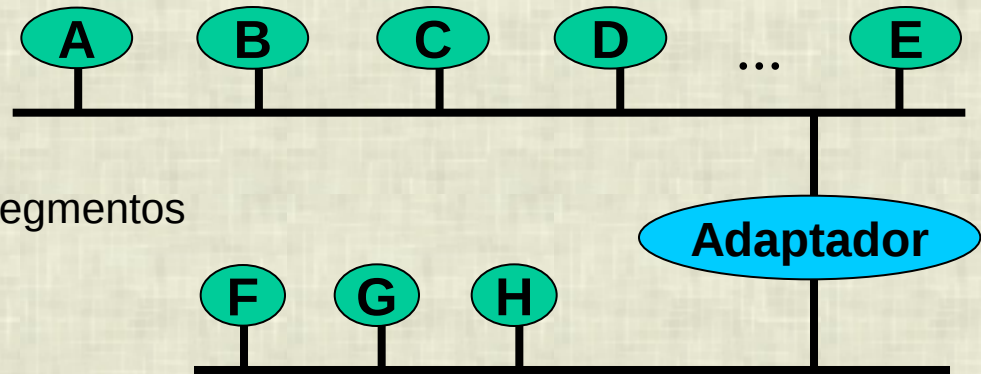
Número de segmentos

- **Comunicação**

- Nodos se comunicam diretamente através de barramentos compartilhados

- **Redundância de comunicação**

- Falha em conexão local não afeta a rede
- Falha em um segmento pode particionar a rede
- Problema em alguma interface bloqueia o funcionamento de um segmento



Matriz de Chaveamento (crossbar)

- **Características**

- Infra-estrutura de comunicação de alto custo
- Permite chaveamento entre dois nodos quaisquer
- Não é bloqueante
 - Sem contenção
- Baixa escalabilidade
 - O que limita é o número de portas
 - Permite acréscimo de nodos aos pares

- **Grau**
2

- **Diâmetro**
1

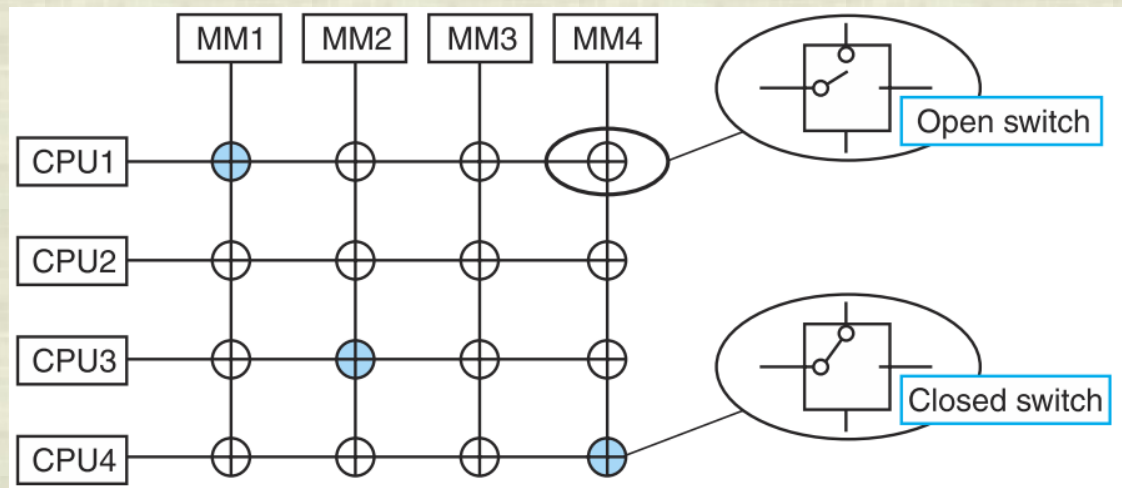
- **Número de conexões**
 $2 \times n^2$

- **Comunicação**

- Inviabiliza, por razões econômicas, sua utilização para interconexão de muitos processadores

- **Uso**

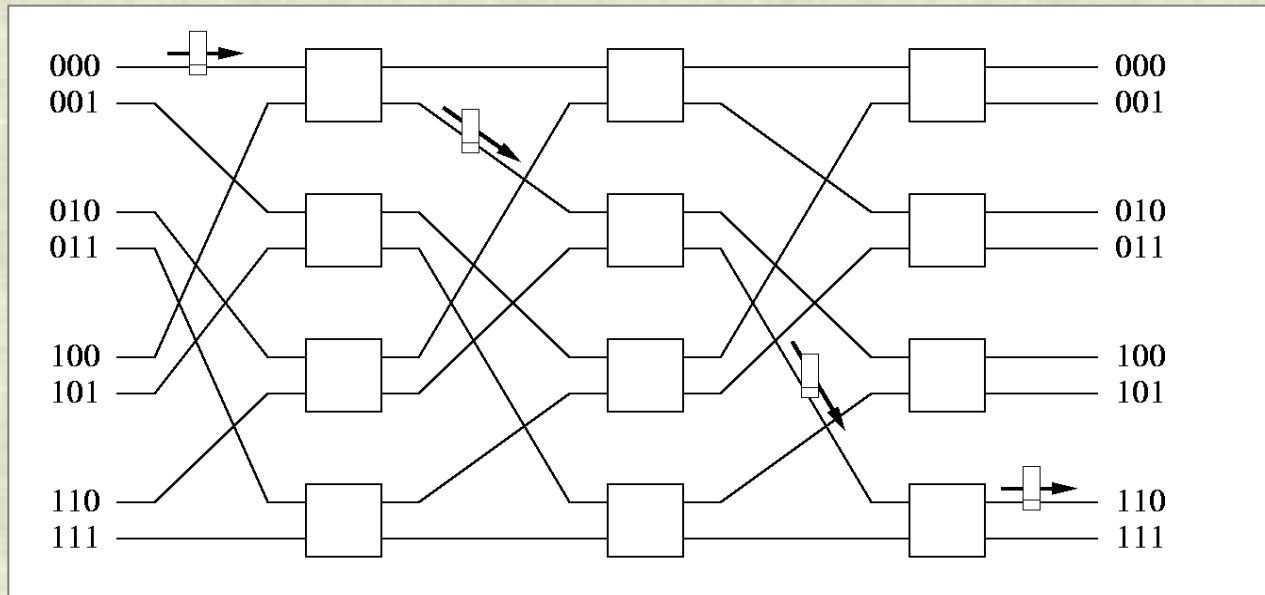
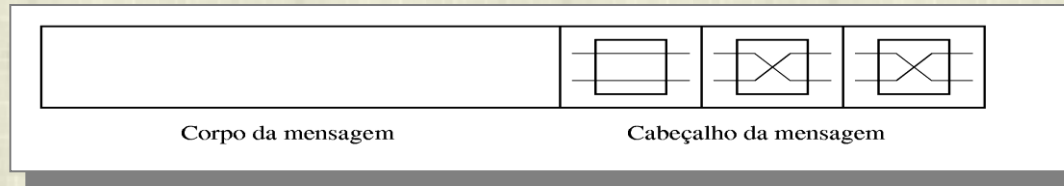
- Infra-estrutura de comunicação **unilateral** para ligar processadores a memórias em um **multiprocessador**
- infra-estrutura de comunicação **bilateral** para interligar processadores de um **multicomputador**



Rede Multinível Ômega

- **Característica das conexões**

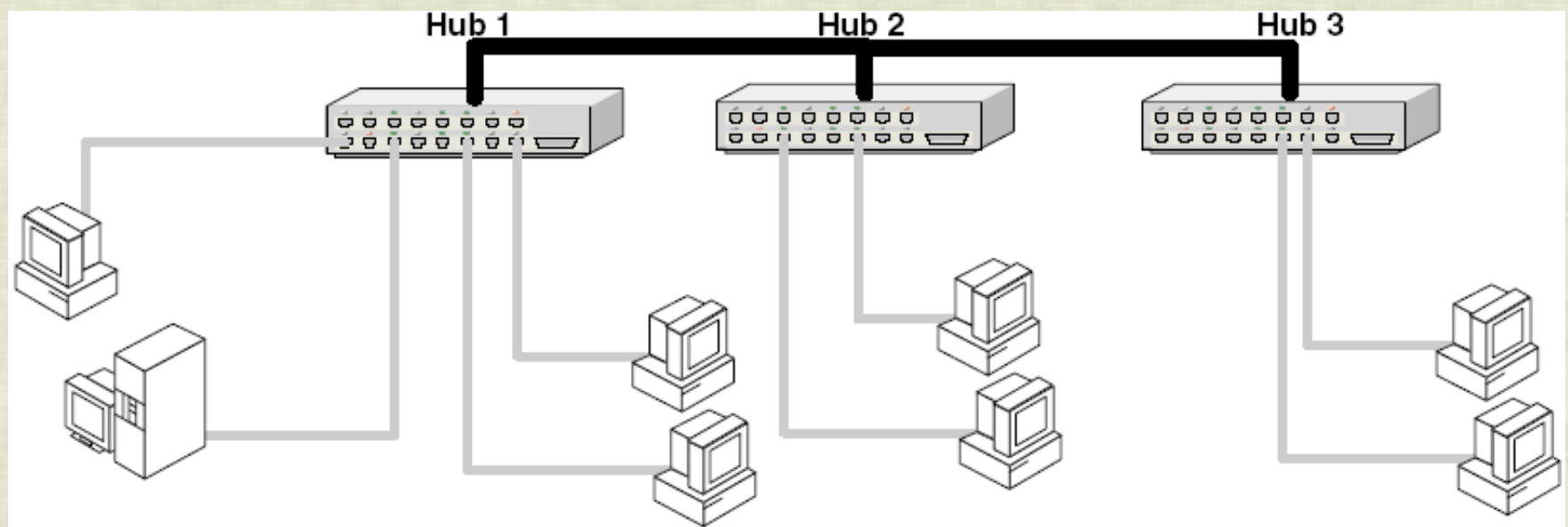
- Número de linhas dado pela metade do número de nodos
- $\log_2 n$ matrizes de chaveamento por caminho
- Existe apenas um caminho possível entre entrada e saída
 - A escolha do caminho é muito eficiente e pode ser feita de forma descentralizada
 - Essa falta de redundância torna a rede bloqueante



Rede Híbrida (Barramento-estrela)

- **Composição de Topologias**

- Também chamadas de topologias híbridas
- Caso mais comum para grandes corporações e WANs



Características Topológicas

Redes	Grau do Nó	Diâmetro da rede	Número conexões
Linear	2 e 4	$n - 1$	$2 \times (n - 1)$
Totalmente conectada	$2 \times (n - 1)$	1	$n^2 - n$
Árvore binária (completa)	2, 4 e 6	$2 \times \log_2(n + 1) - 2$	$2 \times (n - 1)$
Estrela	2 e $2 \times (n - 1)$	1 ou 2	$2 \times (n - 1)$
Anel simples (bi)	4	$n / 2$	$2 \times n$
Malha 2D (quadrada)	4, 6 e 8	$2 \times (\sqrt{n} - 1)$	$4 \times (n - \sqrt{n})$
Toro dobrado 2D	8	$\sqrt{n} - 1$	$4 \times n$
Hipercubo 3D	6	$\log_2(n)$	$3 \times n$
Hipercubo 4D	8	$\sqrt{n}$	$4 \times n$
Barramento	2	1	1
Crossbar (bi)	2	1	$2 \times n^2$
Rede Omega	4	3	$3 \times n$

Eficácia de Topologias para Diferentes Requisitos de Escritores e Leitores

Redes	1-para-1 (Unicast)	Todos-para-1	1-para-todos (Broadcast)	Máximo simultâneo
Linear	$n - 1$	$(n^2 - n) / 2$	$n - 1$	$2 \times (n - 1)$
Total. conectada	1	1	1	$n^2 - n$
Árvore binária	$2 \times (\log_2(n+1) - 1)$	$n - 1$	$2 \times (\log_2(n+1) - 1)$	$2 \times (n - 1)$
Estrela	2	$n - 1$	2	$2 \times (n - 1)$
Anel simples (bi)	$n / 2$	$n / 2$	$n / 2$	$2 \times n$
Malha 2D	$2 \times (\sqrt{n} - 1)$	$\lfloor n / 2 \rfloor$	$2 \times (\sqrt{n} - 1)$	$4 \times (n - \sqrt{n})$
Toro dobrado 2D	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$	$4 \times n$
Hipercubo 3D	$\log_2(n)$	$\log_2(n)$	$\log_2(n)$	$3 \times n$
Hipercubo 4D	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n} + 1$	$\sqrt{n}$	$4 \times n$
Barramento	1	$n - 1$	1	1
Crossbar (bi)	1	1	1	$2 \times (n - 1)$
Rede Omega	$\log_2(n)$	$n \times \log_2(n)$	$\log_2(n)$	n

Índice

1. Introdução

2. Topologias

3. Exercícios

Exercícios

1. Diferencie a topologia física da topologia lógica de uma infra-estrutura de comunicação
2. Cite algumas topologias físicas de redes
3. Quais as semelhanças entre a topologia tipo barramento e a topologia de rede estrela?
4. É possível implementar uma topologia lógica em uma topologia física completamente diferente? Qua(l)/(is) a(s) consequência(s)?
5. Qual das alternativas abaixo melhor descrevem uma topologia?
 - O processo de transferência de um pacote
 - Uma forma de roteamento
 - Múltiplos tipos de rede
 - O arranjo físico das máquinas e conexões ou o arranjo lógico do tráfego de mensagens nos fios
6. Compare diversas topologias de rede em termos de redundância de caminhos de comunicação
7. Compare duas topologias com relação ao quesito tolerância a falhas
8. Compare a rede malha com a rede ômega com relação à contenção de pacotes

Exercícios

- 9. Em uma arquitetura de 6 processadores, calcule o tempo total para cada processador enviar uma mensagem para os outros 5 processadores, com infra-estruturas de comunicação do tipo: (a) barramento, (b) anel bidirecional simples, (c) crossbar e (d) torus 2D. Desenhe as infra-estruturas de comunicação
- 10. Quando se deseja uma maior flexibilidade de interconexão, se utilizam redes dinâmicas. Apresente uma rede dinâmica do tipo bloqueante e outra do tipo não bloqueante. Qual a mais utilizada, e por qual razão?
- 11. Desenhe uma infra-estrutura de comunicação que possua grau 4 para interligar 7 processadores
- 12. Defina os parâmetros "grau do nó" e "diâmetro de uma rede" em arquiteturas tipo MIMD conectada por uma rede. De o grau dos nós e o diâmetro das seguintes redes:

Rede	Grau	Diâmetro
Anel simples bidirecional		
Árvore binária completa		
Toro 2D		

Exercícios

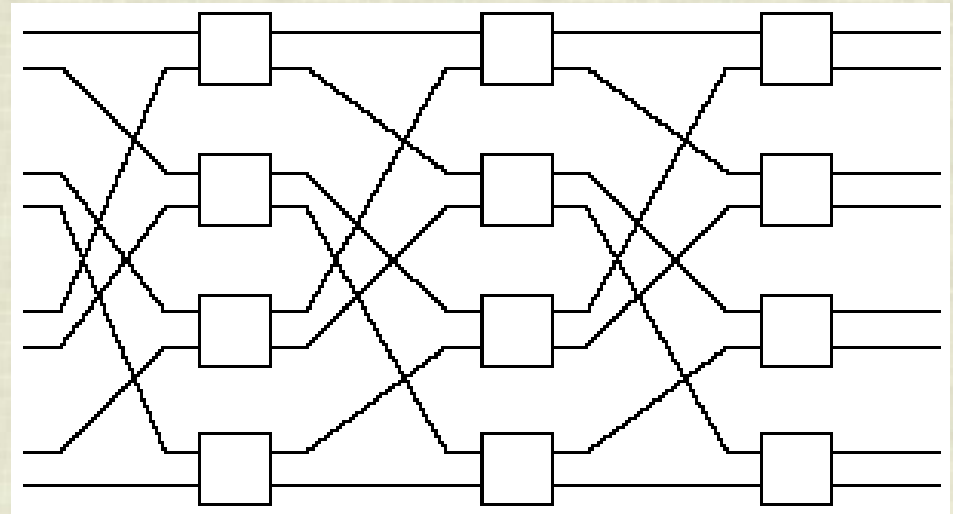
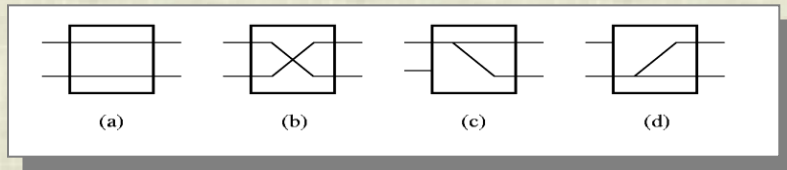
13. Você foi contratado para projetar uma rede para os seguintes ambientes descritos a seguir. Quais configurações de rede você irá utilizar? Justifique
- Um campus universitário e
 - Um andar de dormitórios
14. Explique como a escolha de uma infra-estrutura de comunicação pode aumentar o desempenho de uma aplicação. É possível que uma infra-estrutura de comunicação tenha um ótimo resultado em uma aplicação e ruim em outra?
15. (ENADE 2005 Eng. II - 52) Considere os seguintes custos para os componentes de uma rede de computadores: R\$ 1000,00 para um nó, R\$ 200,00 para uma placa adaptadora entre uma conexão bidirecional e um nó, e R\$ 100,00 para estabelecer uma conexão física bidirecional entre dois nós. Foram implementadas três redes (R1, R2 e R3), conectando-se quatro nós em três topologias distintas: R1 em estrela, R2 em anel e R3 totalmente conectada. Os custos das redes R1, R2 e R3, respectivamente, serão:
- a) R\$ 6000,00, R\$ 6000,00 e R\$ 6000,00
 - b) R\$ 6000,00, R\$ 5200,00 e R\$ 6200,00
 - c) R\$ 5500,00, R\$ 6000,00 e R\$ 7000,00
 - d) R\$ 5000,00, R\$ 7000,00 e R\$ 7800,00
 - e) R\$ 5500,00, R\$ 7000,00 e R\$ 7000,00

Resposta de Exercícios

13. Você foi contratado para projetar uma rede para os seguintes ambientes descritos a seguir. Quais configurações de rede você irá utilizar? Justifique
- Um campus universitário e
 - Um andar de dormitórios
14. Explique como a escolha de uma infra-estrutura de comunicação pode aumentar o desempenho de uma aplicação. É possível que uma infra-estrutura de comunicação tenha um ótimo resultado em uma aplicação e ruim em outra?
15. (ENADE 2005 Eng. II - 52) Considere os seguintes custos para os componentes de uma rede de computadores: R\$ 1000,00 para um nó, R\$ 200,00 para uma placa adaptadora entre uma conexão bidirecional e um nó, e R\$ 100,00 para estabelecer uma conexão física bidirecional entre dois nós. Foram implementadas três redes (R1, R2 e R3), conectando-se quatro nós em três topologias distintas: R1 em estrela, R2 em anel e R3 totalmente conectada. Os custos das redes R1, R2 e R3, respectivamente, serão:
- a) R\$ 6000,00, R\$ 6000,00 e R\$ 6000,00
 - b) R\$ 6000,00, R\$ 5200,00 e R\$ 6200,00
 - c) R\$ 5500,00, R\$ 6000,00 e R\$ 7000,00
 - d) R\$ 5000,00, R\$ 7000,00 e R\$ 7800,00
 - e) R\$ 5500,00, R\$ 7000,00 e R\$ 7000,00

Exercícios

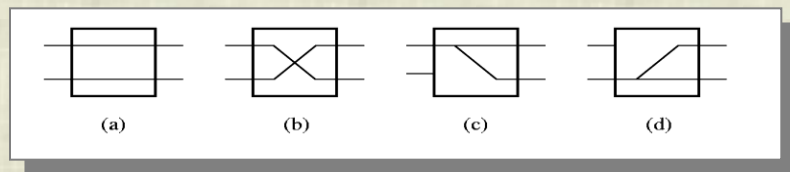
16. Mostre que a infra-estrutura abaixo é bloqueante fixando um caminho e mostrando outro que não podem ser utilizados ao mesmo tempo (considerando chaveamento de circuito)



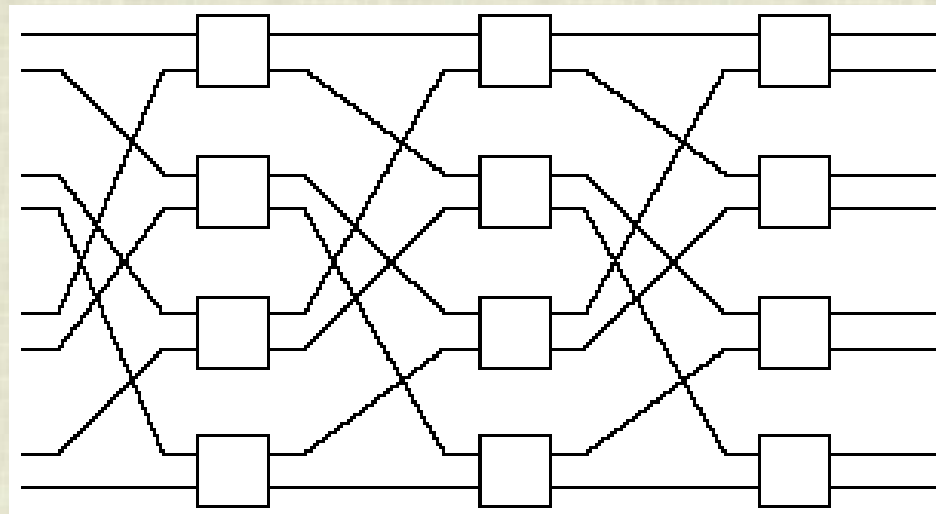
17. Compare uma infra-estrutura de comunicação do tipo barramento com uma rede tipo estrela com relação à escalabilidade, segurança, desempenho e contenção de pacotes
18. Discuta a afirmação: “É importante destacar que não adianta quebrar a memória principal em vários módulos se a rede de interconexão não suportar múltiplas transações”
19. Como uma rede crossbar pode ser usada para a construção de um multicomputador (desenhe)?

Resposta de Exercícios

16. Mostre que a infra-estrutura abaixo é bloqueante fixando um caminho e mostrando outro que não podem ser utilizados ao mesmo tempo (considerando chaveamento de circuito)



Comunicação 3-A conflita com comunicação 1-B



17. Compare uma infra-estrutura de comunicação do tipo barramento com uma rede tipo estrela com relação à escalabilidade, segurança, desempenho e contenção de pacotes
18. Discuta a afirmação: “É importante destacar que não adianta quebrar a memória principal em vários módulos se a rede de interconexão não suportar múltiplas transações”
19. Como uma rede crossbar pode ser usada para a construção de um multicomputador (desenhe)?

Exercícios

19. (POSCOMP 2009 - 25) Dada uma rede de interconexão estática com topologia hipercúbica de dimensão seis, com 64 nós, considere as afirmativas a seguir:
- I. Os nós com numeração binária igual a 010101 e 101010 são vizinhos.
 - II. São necessários 192 canais (*links*) para a construção desta rede.
 - III. Existem 5 nós conectados diretamente ao nó 111000.
 - IV. O maior caminho mínimo entre dois nós da rede é igual a 6.
 - V. Se cada canal (*link*) da rede tem taxa de transmissão de 100 Mb/s, a largura de banda da bissecção é igual a 3,2 Gb/s.

Assinale a alternativa **CORRETA**:

- A) Apenas a afirmativa IV está correta.
- B) Apenas as afirmativas III e IV estão corretas.
- C) Apenas as afirmativas I e V estão corretas.
- D) Apenas as afirmativas II, IV e V estão corretas.
- E) Todas as afirmativas estão corretas.

Resposta de Exercícios

19. (POSCOMP 2009 - 25) Dada uma rede de interconexão estática com topologia hipercúbica de dimensão seis, com 64 nós, considere as afirmativas a seguir:
- I. Os nós com numeração binária igual a 010101 e 101010 são vizinhos.
 - II. São necessários 192 canais (*links*) para a construção desta rede.
 - III. Existem 5 nós conectados diretamente ao nó 111000.
 - IV. O maior caminho mínimo entre dois nós da rede é igual a 6.
 - V. Se cada canal (*link*) da rede tem taxa de transmissão de 100 Mb/s, a largura de banda da bissecção é igual a 3,2 Gb/s.

Assinale a alternativa *CORRETA*:

- A) Apenas a afirmativa IV está correta.
- B) Apenas as afirmativas III e IV estão corretas.
- C) Apenas as afirmativas I e V estão corretas.
- D) Apenas as afirmativas II, IV e V estão corretas.
- E) Todas as afirmativas estão corretas.