



QXD-005 - Arquitetura de Computadores

Entrada/Saída

Prof. Pedro Botelho

Nas Aulas Passadas...

- Visão de Alto Nível do Computador
- Sistemas de Memórias (cache, interna e externa)
- Questão: Como obter dados para processar e mostrá-los ao usuário?

Nesta Aula...

- Dispositivos Externos
- Módulos de E/S
- Técnicas de E/S
 - E/S Programada (*Polling*)
 - E/S Dirigida por Interrupções
 - Acesso Direto à Memória (DMA)
- Processadores e Canais de E/S
- Padrões de Interconexão Externa

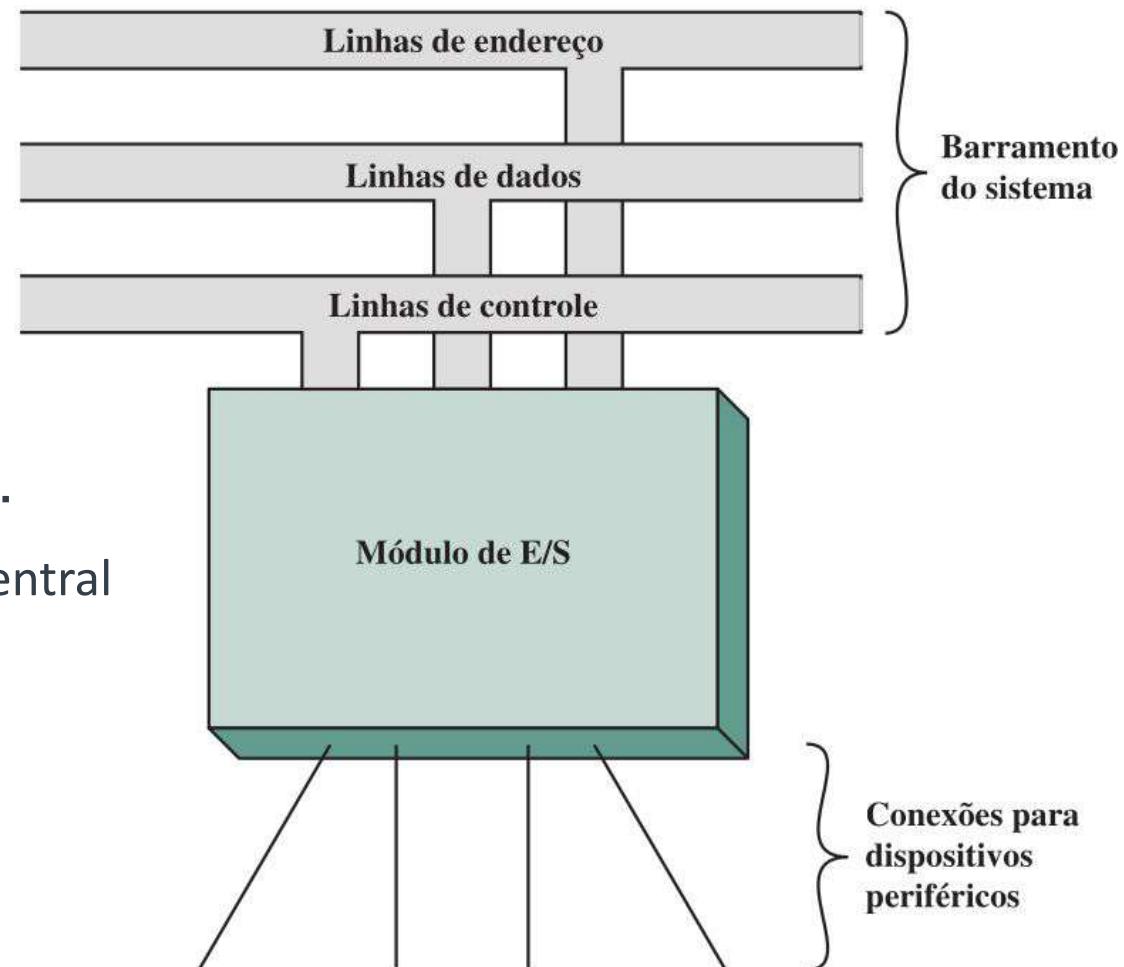


Entrada/Saída

Dispositivos Externos

Modelo Genérico do Módulo de E/S

- Grande variedade de **periféricos**
 - Entrega de diferentes quantidades de dados
 - Em velocidades diferentes
 - Em diferentes formatos
- A maioria deles é mais lenta que CPU e RAM
- Necessita de **módulos** de E/S como interface...
 - ...para CPU e memória via barramento ou *switch* central
 - ...para um ou mais periféricos

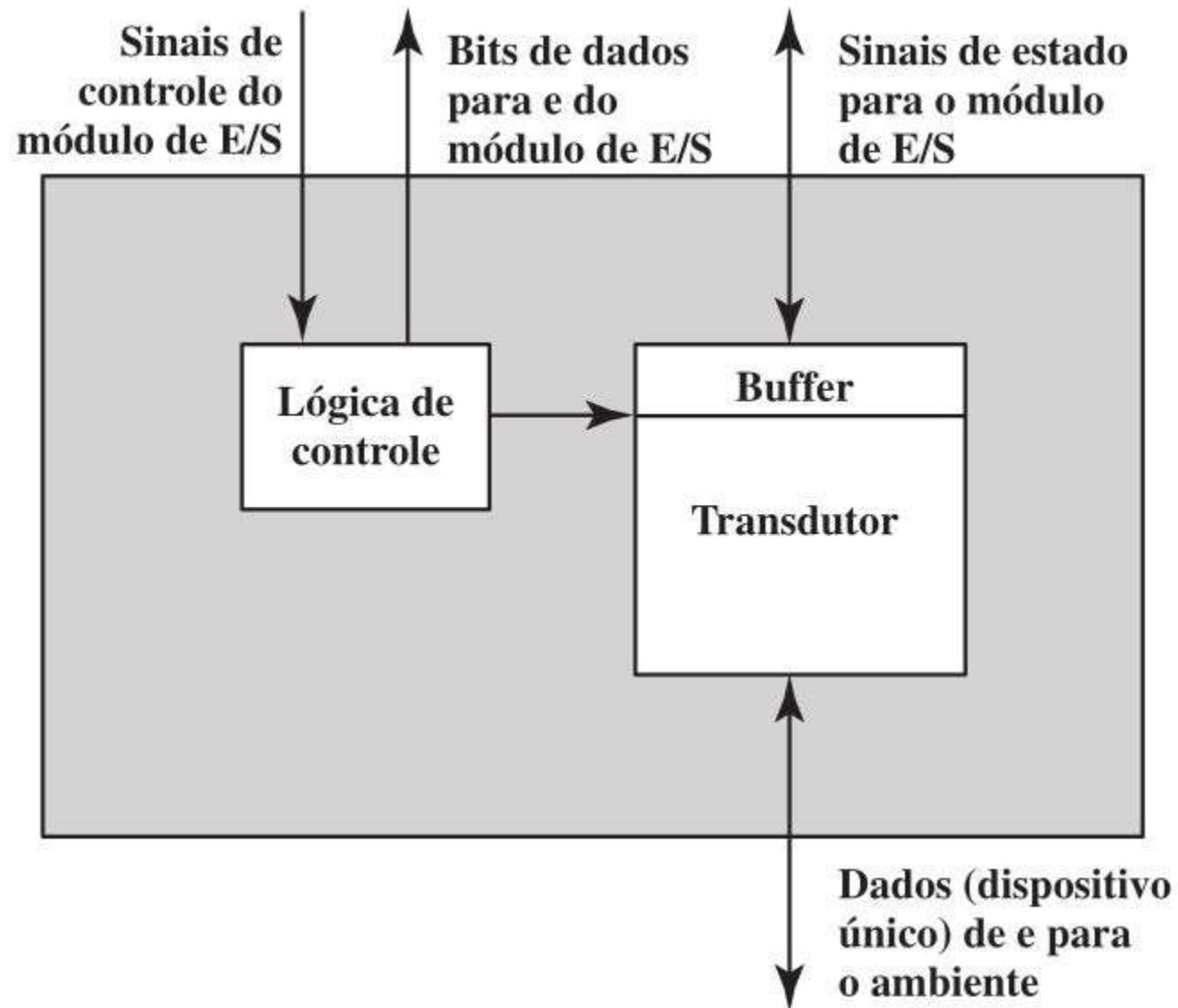


Dispositivos Externos

- Operações de E/S são realizadas por meio de vários dispositivos externos
- Conecta-se ao computador por uma conexão com um módulo de E/S (**interface**)
- A interface com o módulo de E/S ocorre na forma de:
 - **Sinais de controle:** Função que o dispositivo irá realizar e.g. leitura no módulo ou algo específico
 - **Sinais de dados:** Dados enviados entre o dispositivo e o módulo e.g. tecla apertada
 - **Sinais de estado:** Estado do dispositivo e.g. pronto (*ready*) ou não
- A **lógica de controle** do dispositivo controla a operação do dispositivo em resposta ao módulo de E/S

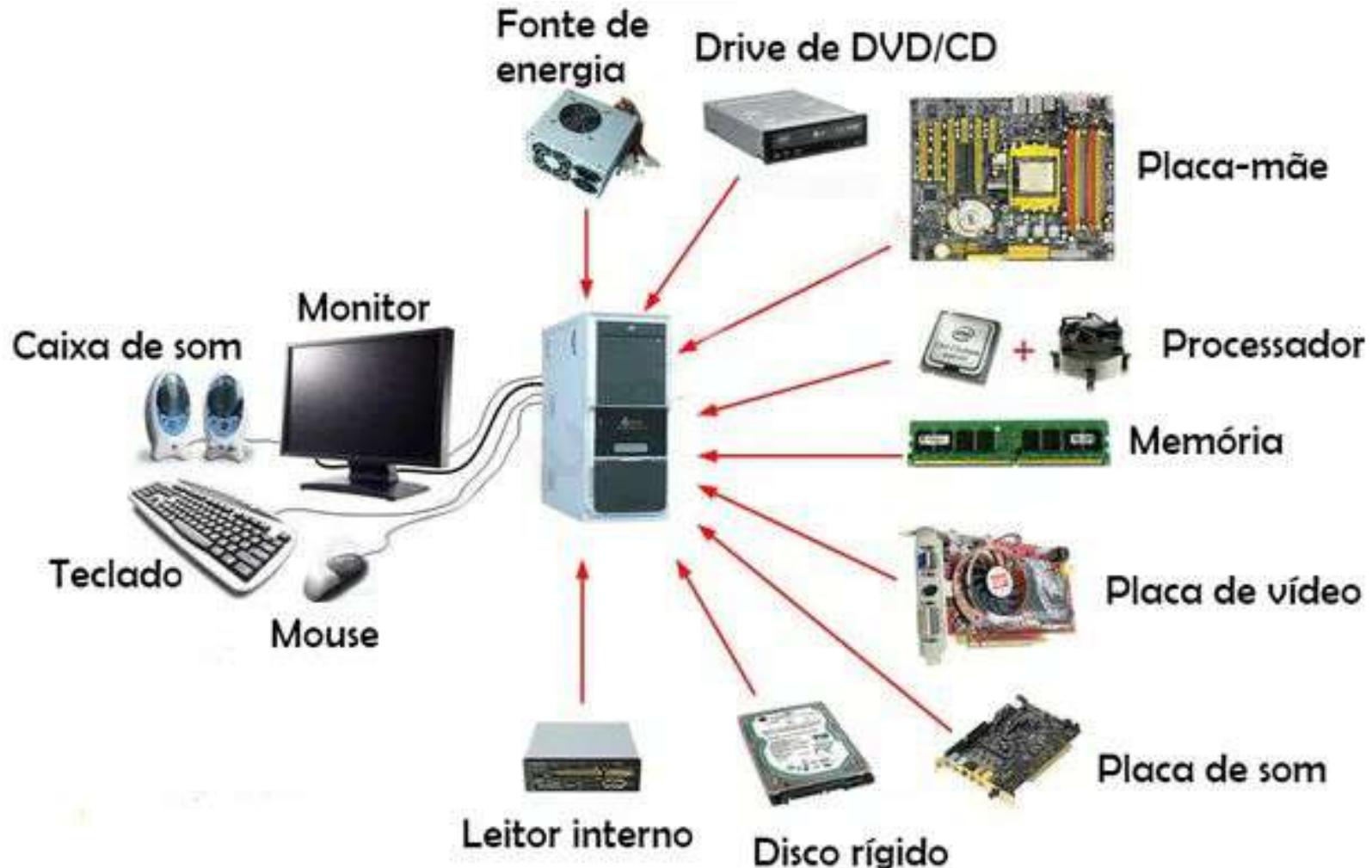


Diagrama de Blocos do Dispositivo Externo



Exemplos de Dispositivos de um Computador

- Geralmente dispositivos para interação entre computador/usuário:



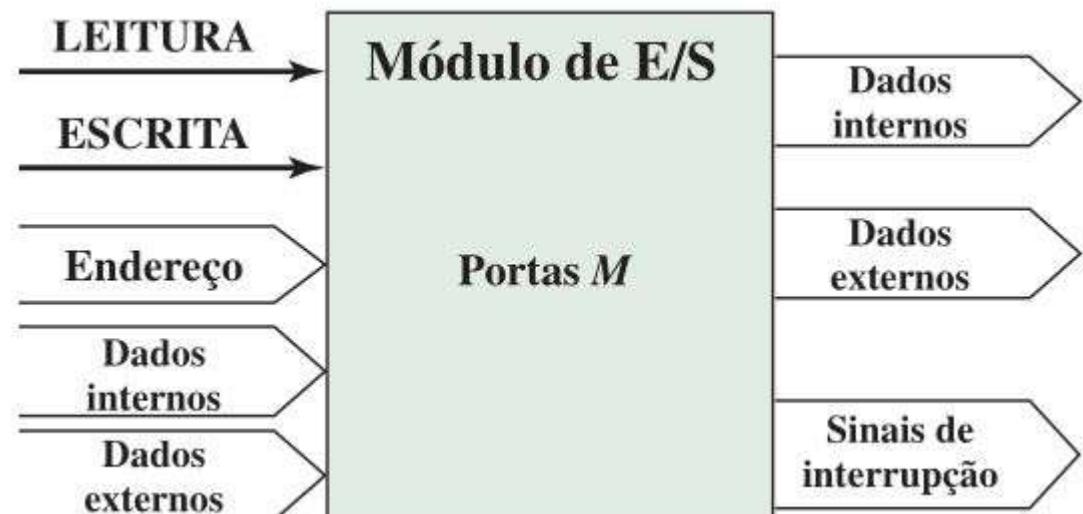


Entrada/Saída

Módulos de E/S

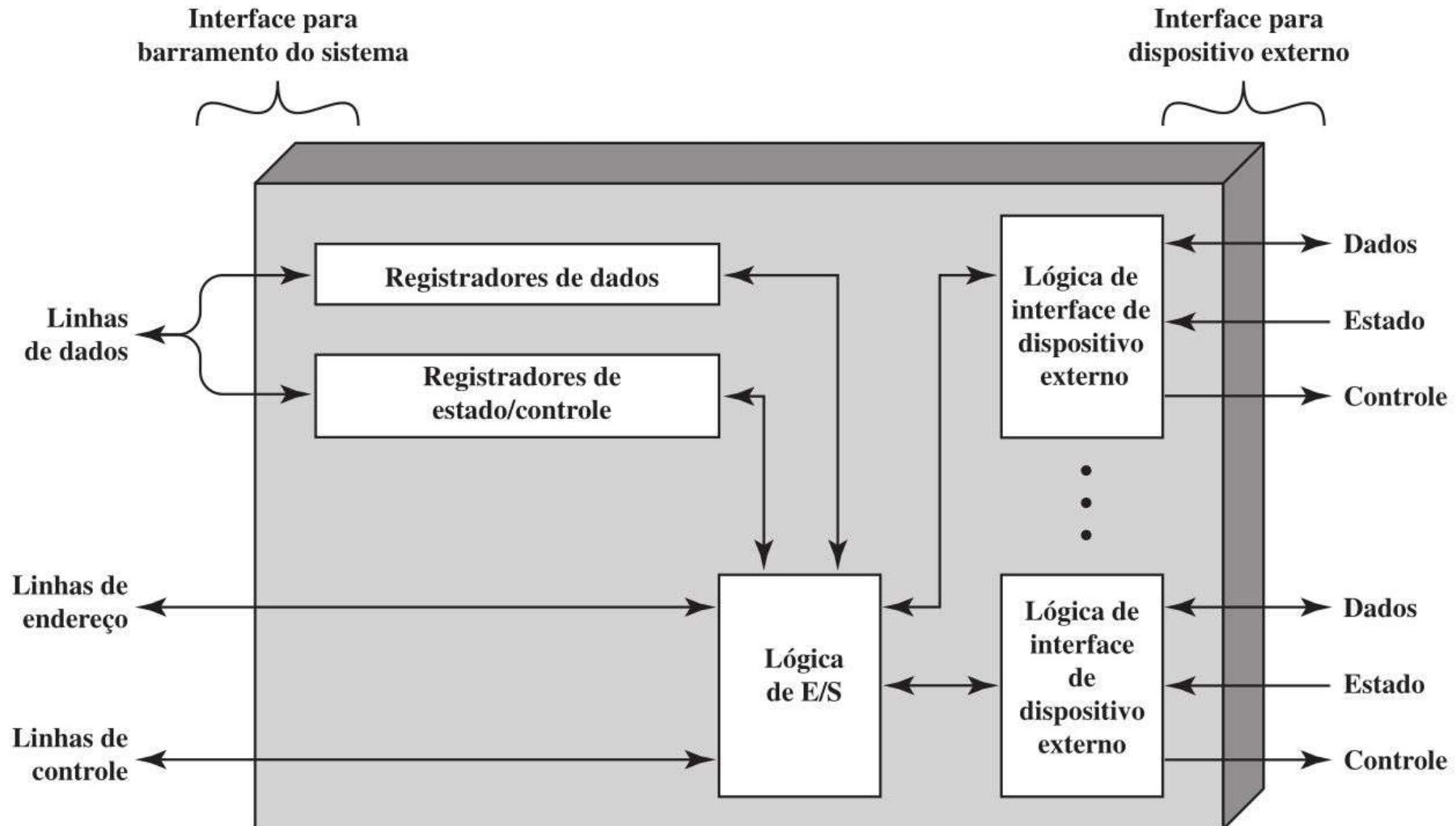
Função do Módulo de E/S

- **Controle e Temporização:** da transferência de dados (mais a seguir)
- **Comunicação com o Processador:** Por meio do *barramento do sistema*...
 - **Comandos e Dados:** trocados entre a CPU e o módulo de E/S
 - **Relatório de Status:** como os periféricos são lentos, a CPU precisa saber o status do módulo de E/S
 - **Reconhecimento de Endereço:** módulos são acessados da mesma forma que os locais de memória
- **Comunicação com o Dispositivo:** por comandos, informações de *status* e dados
- **Buffering de Dados:** para lidar com as diferentes taxas de transferência entre a memória e os dispositivos periféricos
- **Detecção de Erro:** e relatar à CPU

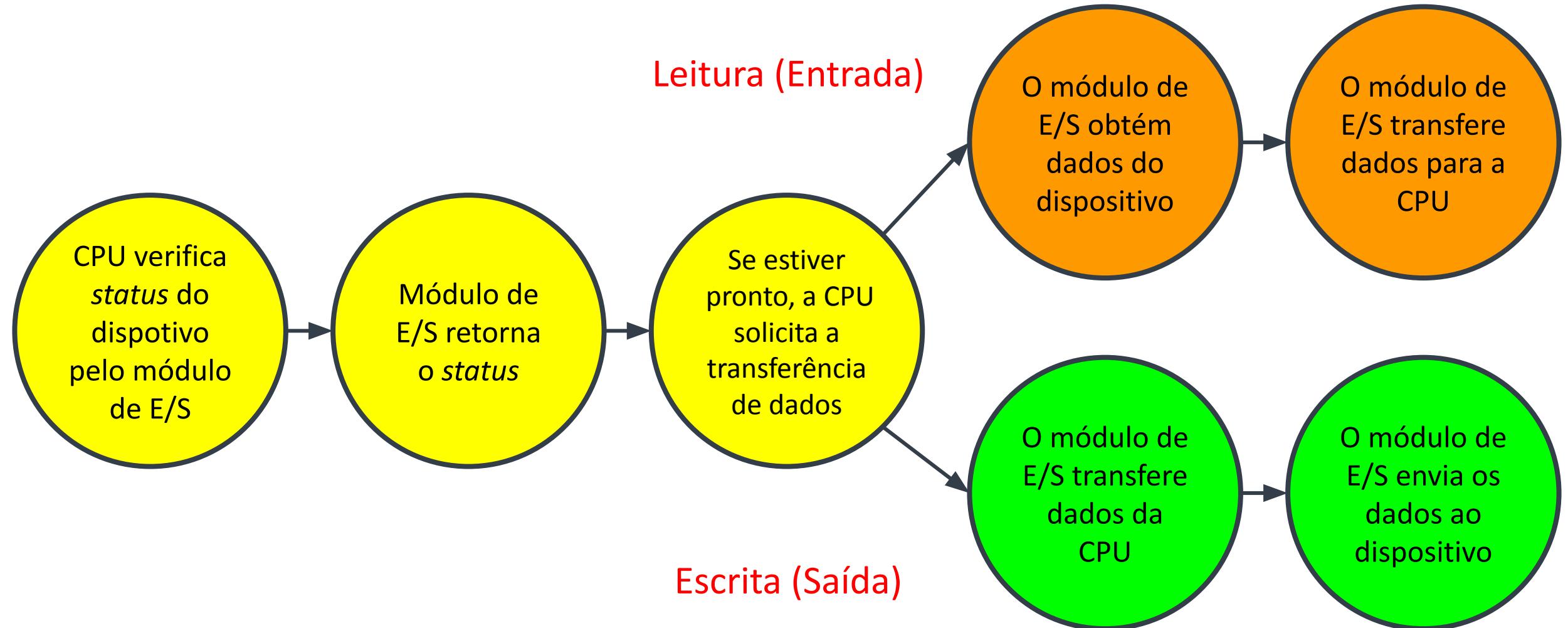


Estrutura do Módulo de E/S

- Módulo fornece abstração dos dispositivos de E/S: Uso via comandos simples
 - Mantém uma pequena memória (**registradores**): Dados de/para o dispositivo e *status/controle*

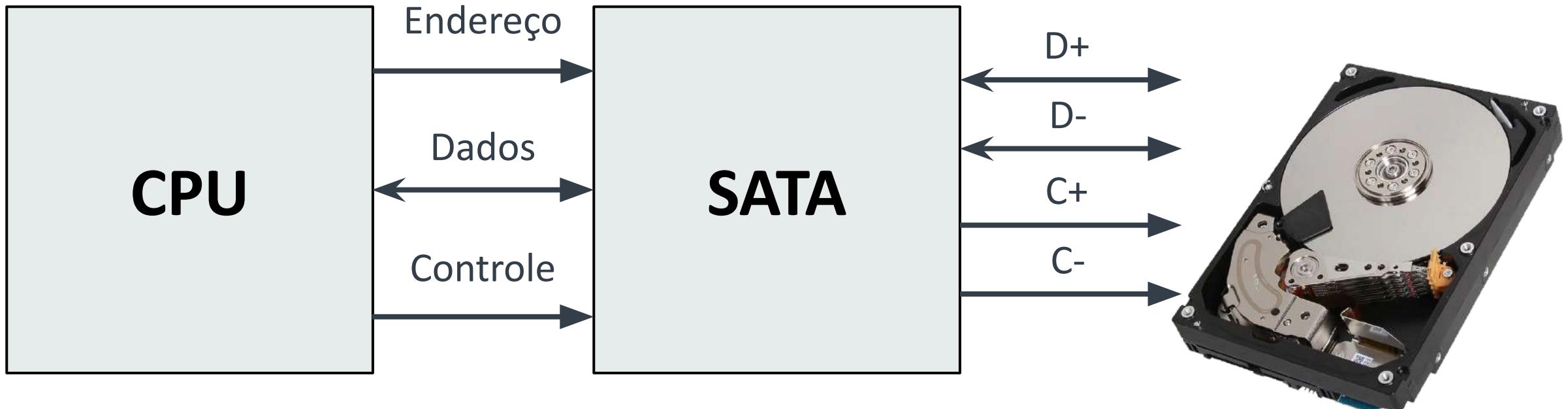


Transferência de Dados do Módulo de E/S



Exemplo: Controladora de Disco (Interface de Hardware)

- CPU envia comandos à controladora de disco (e.g. SATA): Via software.
 - LEIA o BLOCO 134 do HDD
- Controladora de disco “executa” os comandos específicos no disco: Via hardware.
 - LEIA o SETOR 3 da TRILHA 2



Exemplo: Controladora de Disco (Interface de Software)

- Controladora possui uma pequena **memória** de controle
- Cada endereço → *Buffers* (registradores) que é utilizado no controle do dispositivo
 - Exemplo: Dado lido do disco é colocado no **DATAIN**

Endereço	Registrador	Descrição
0	DATAOUT	Dado a ser escrito
1	DATAIN	Dado a ser lido
2	BLOCK	Bloco a ser acessado
3	CONTROL	Informa se está pronto (<i>ready</i>) e operação a ser realizada (1 para escrita e 0 para leitura)

- Como interfacer com o módulo de E/S?
 - Como **endereçar** esses registradores?
 - Como **ler** o dispositivo?

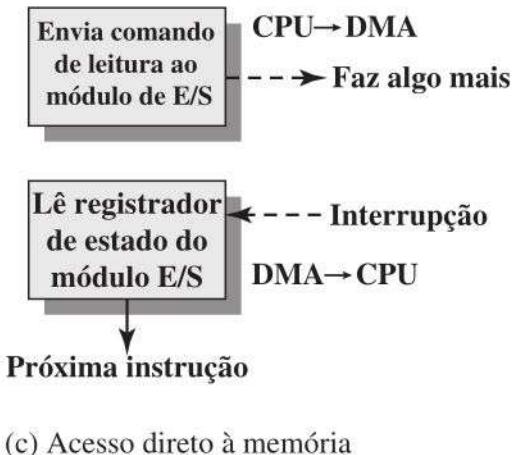
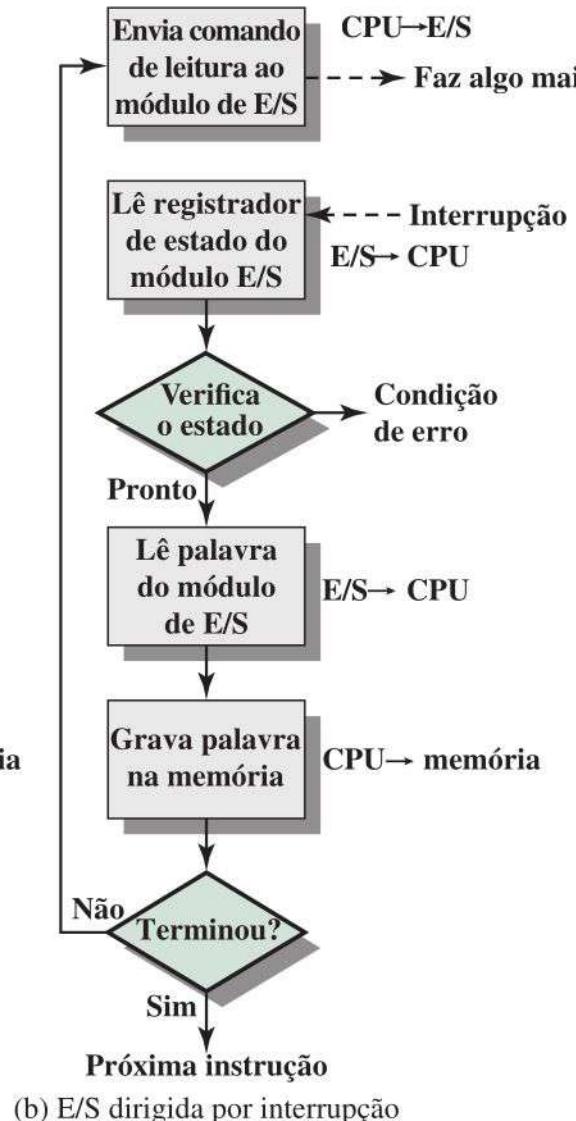
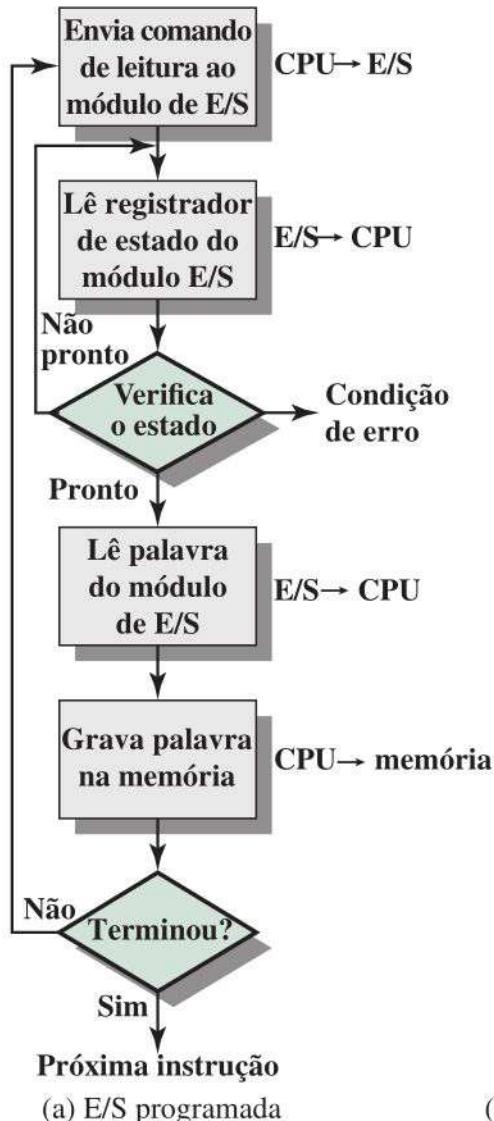
Técnicas de Entrada e Saída

- Três técnicas são usadas para **interfacer** com módulos de E/S:

Técnica	Tarefa	
	Ler Status	Transferência de Dados
E/S Programada (<i>Polling</i>)	CPU	CPU
E/S Dirigida por Interrupção	Módulo de E/S	CPU
Acesso Direto à Memória (DMA)	Módulo DMA	Módulo DMA

	Sem interrupções	Uso de interrupções
Transferência de E/S para memória via processador	E/S programada	E/S controlada por interrupção
Transferência direta de E/S para memória		Acesso direto à memória (DMA)

Entrada de Dados usando as Técnicas





Entrada/Saída

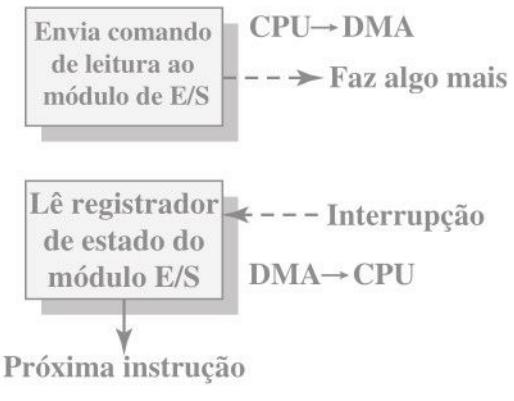
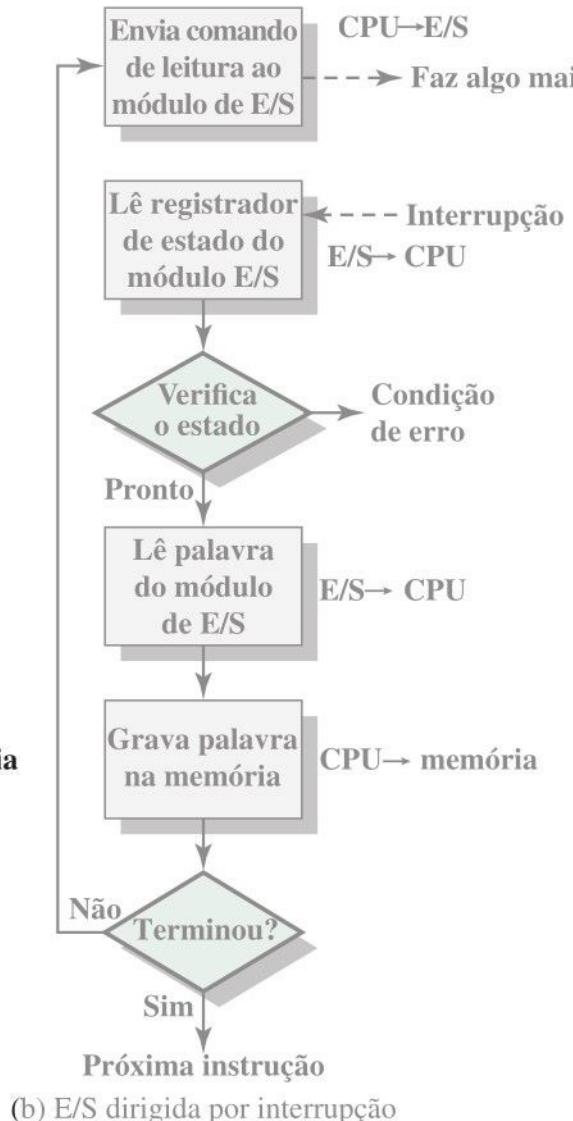
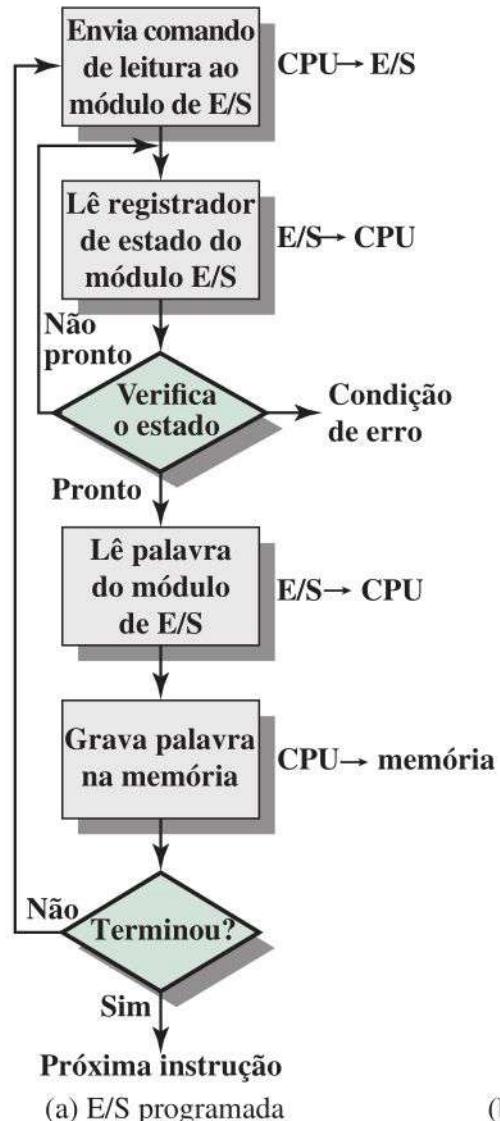
E/S Programada (Polling)

Entrada e Saída Programada

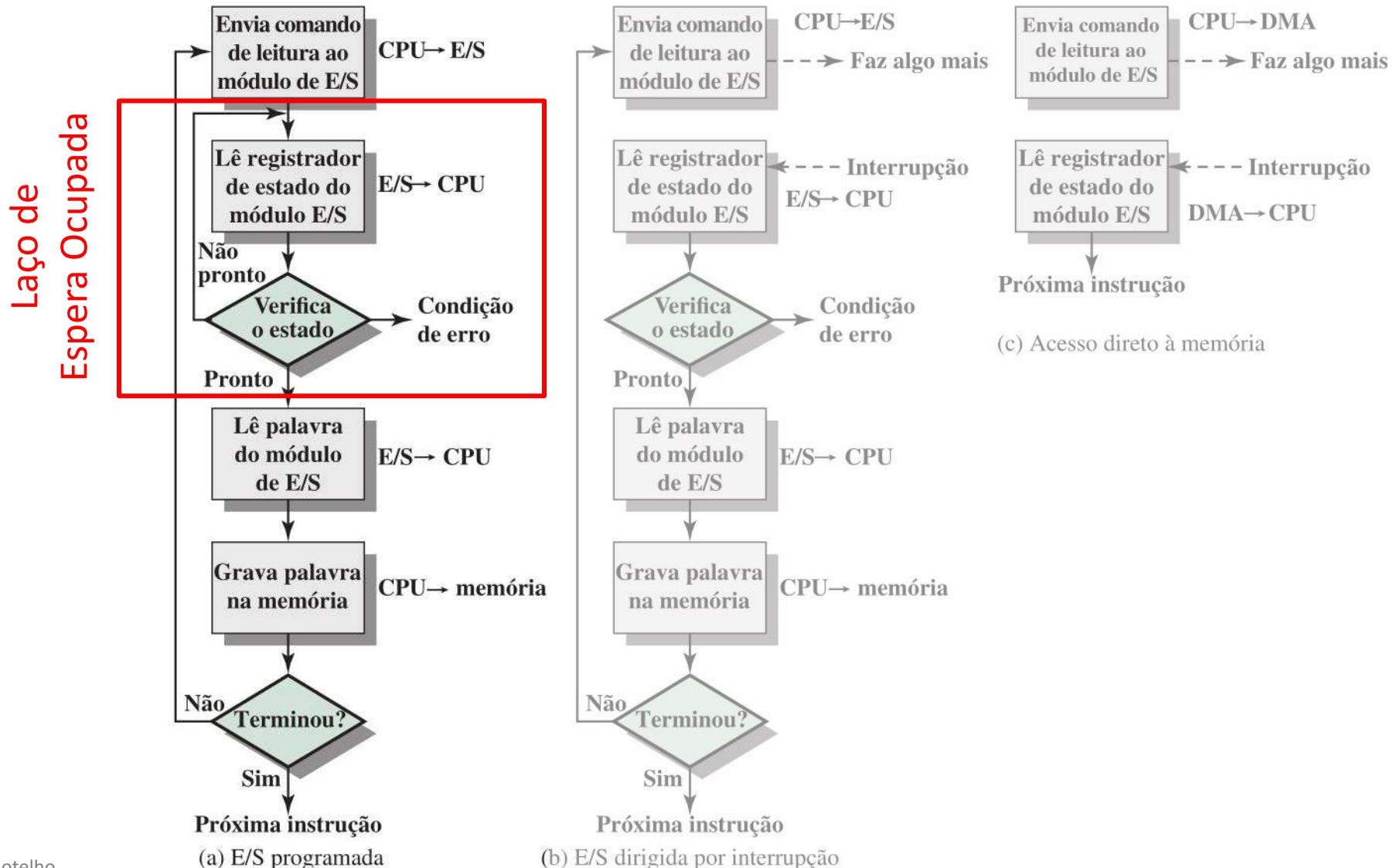
- A CPU tem controle direto sobre E/S:
 - Status de detecção
 - Comandos de leitura/gravação
 - Transferência de dados
- A CPU **aguarda** que o módulo de E/S conclua a operação (*polling*)
- **Vantagem:** Implementação mais simples
- **Desvantagem:** Desperdiça tempo de CPU

```
char ReadDisk() {  
    DiskStartRead();           // solicita a leitura  
    while( ! IsDiskReady() );   // espera o dispositivo  
    return DiskDataIn();       // le o dado  
}
```

Fluxo da E/S Programada



Espera Ocupada da E/S Programada





Entrada/Saída

E/S Dirigida por Interrupção

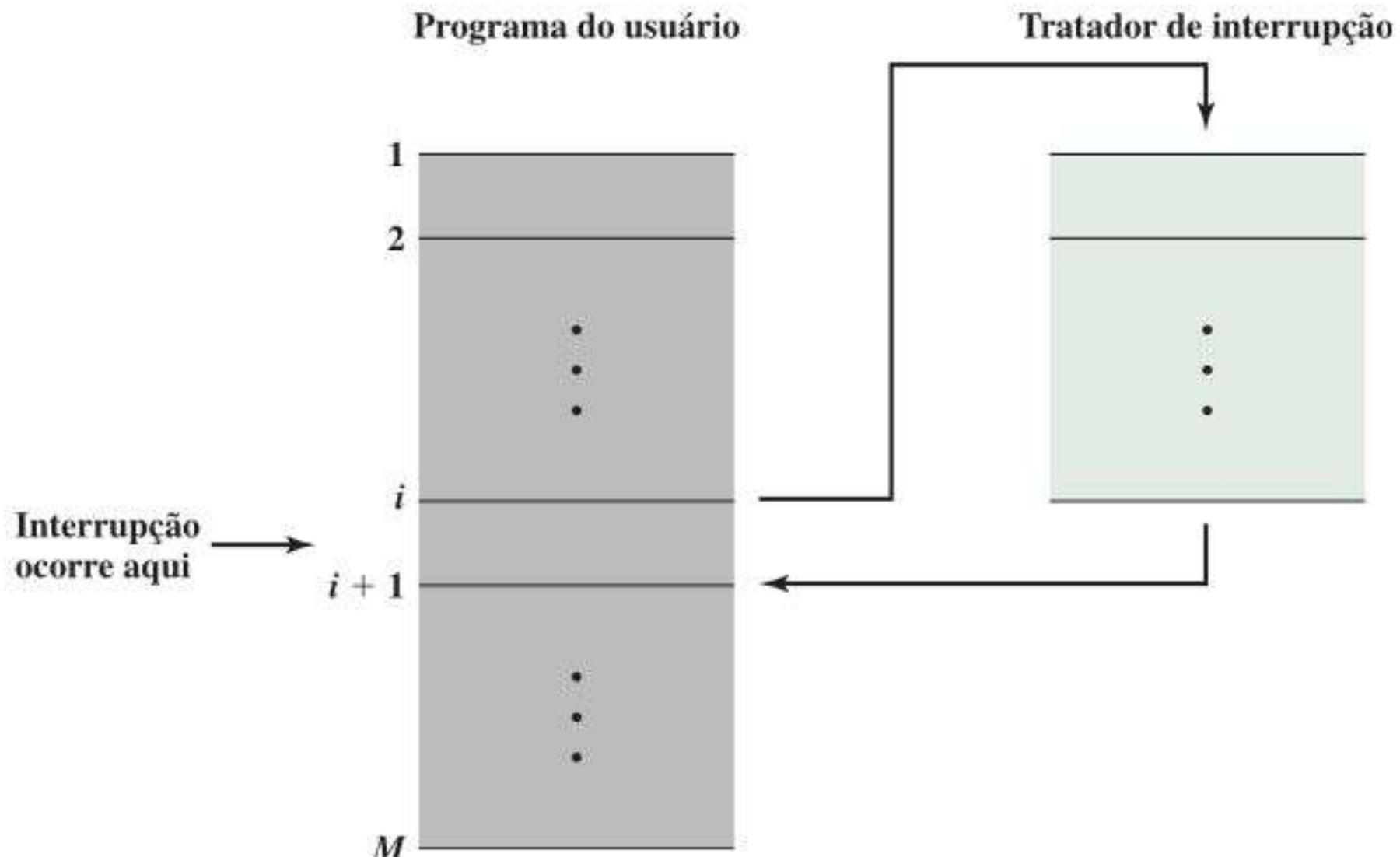
E/S Dirigida por Interrupção

- Resolve o problema da espera da CPU
- O módulo de E/S **interrompe** a CPU quando pronto
- CPU não precisa realizar verificação repetida do dispositivo ou **espera ocupada**

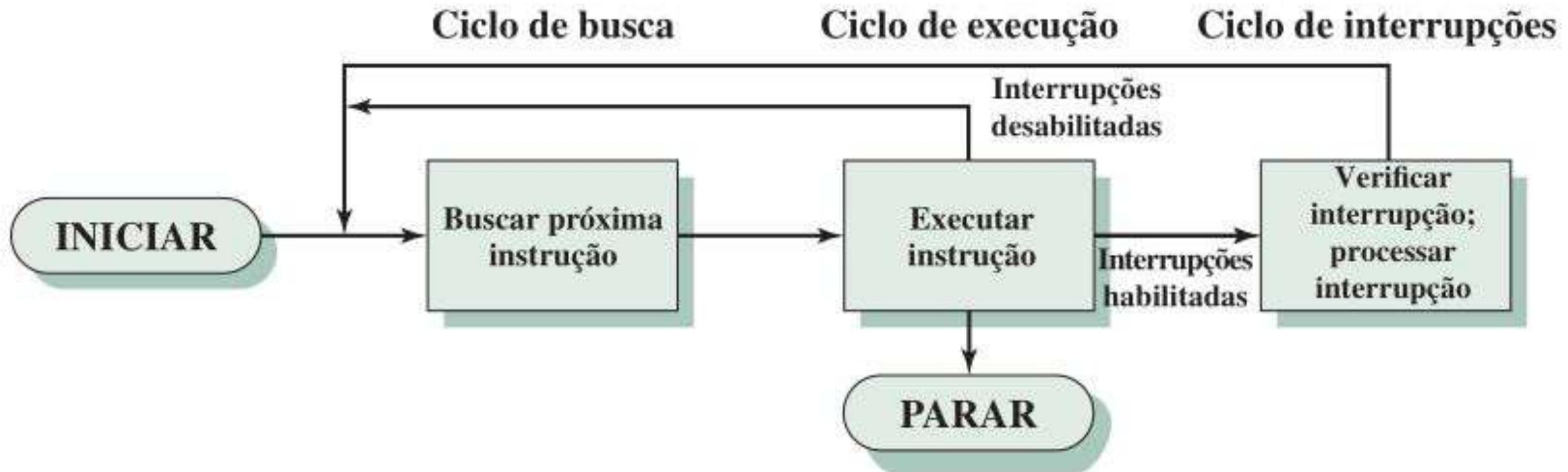
```
// E/S Programada
int main(void) {
    DiskStartRead();
    while( ! IsDiskReady() );
    char disk_data = DiskDataIn();
    DoSomethingElse();
}
```

```
// E/S Dirigida por Interrupção
char disk_data;
void InterruptServiceRoutine() {
    disk_data = DiskDataIn();
}
int main(void) {
    DiskStartRead();
    DoSomethingElse();
}
```

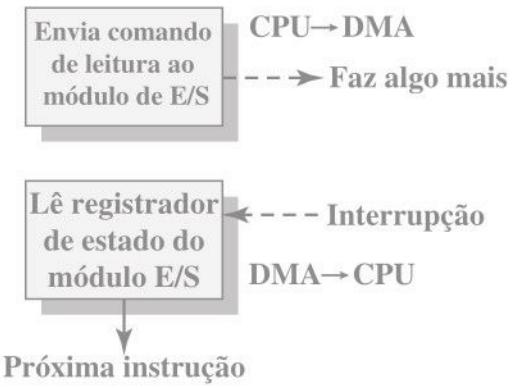
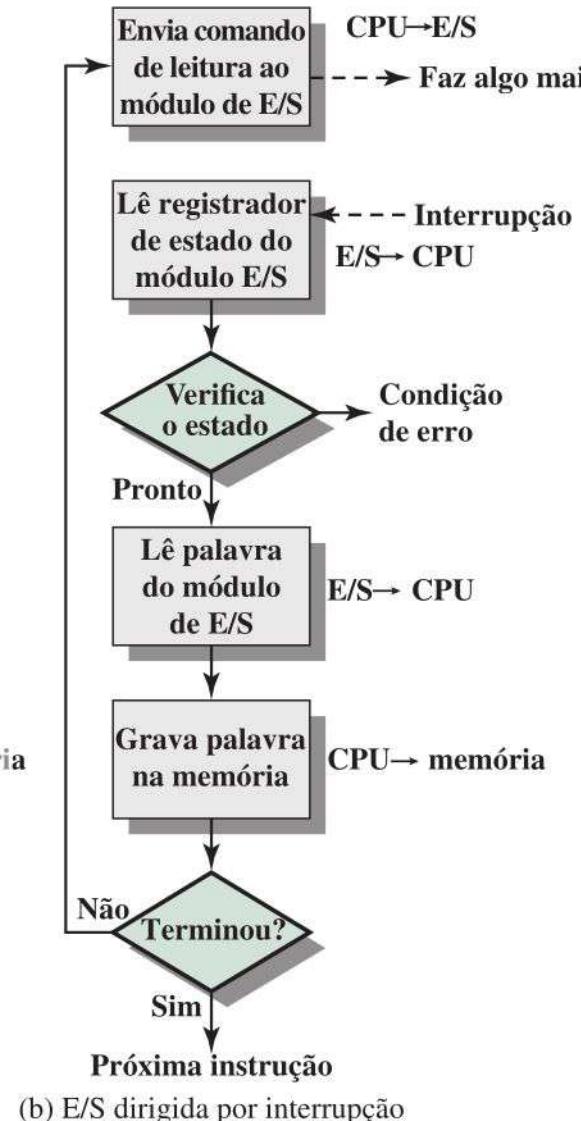
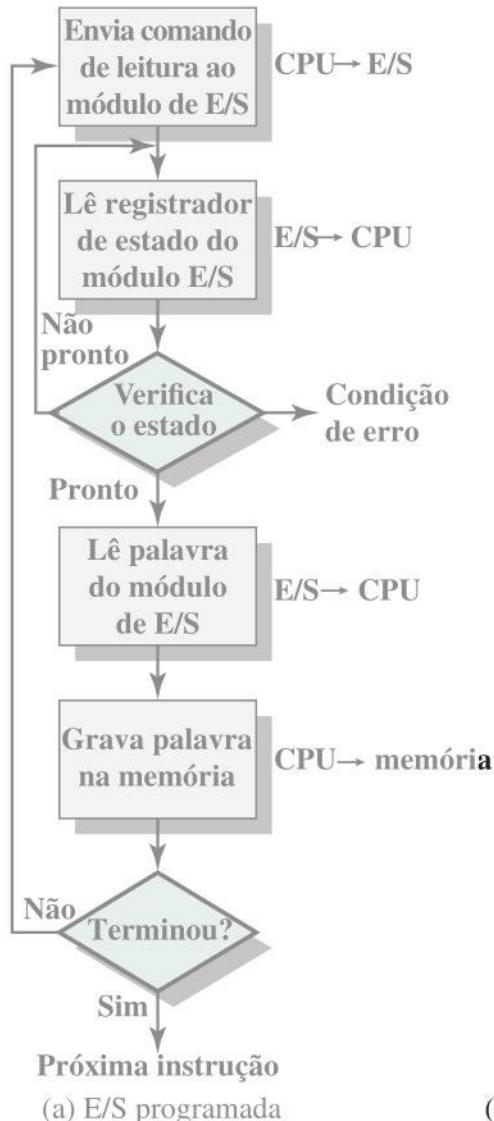
Tratador de Interrupção (ISR)



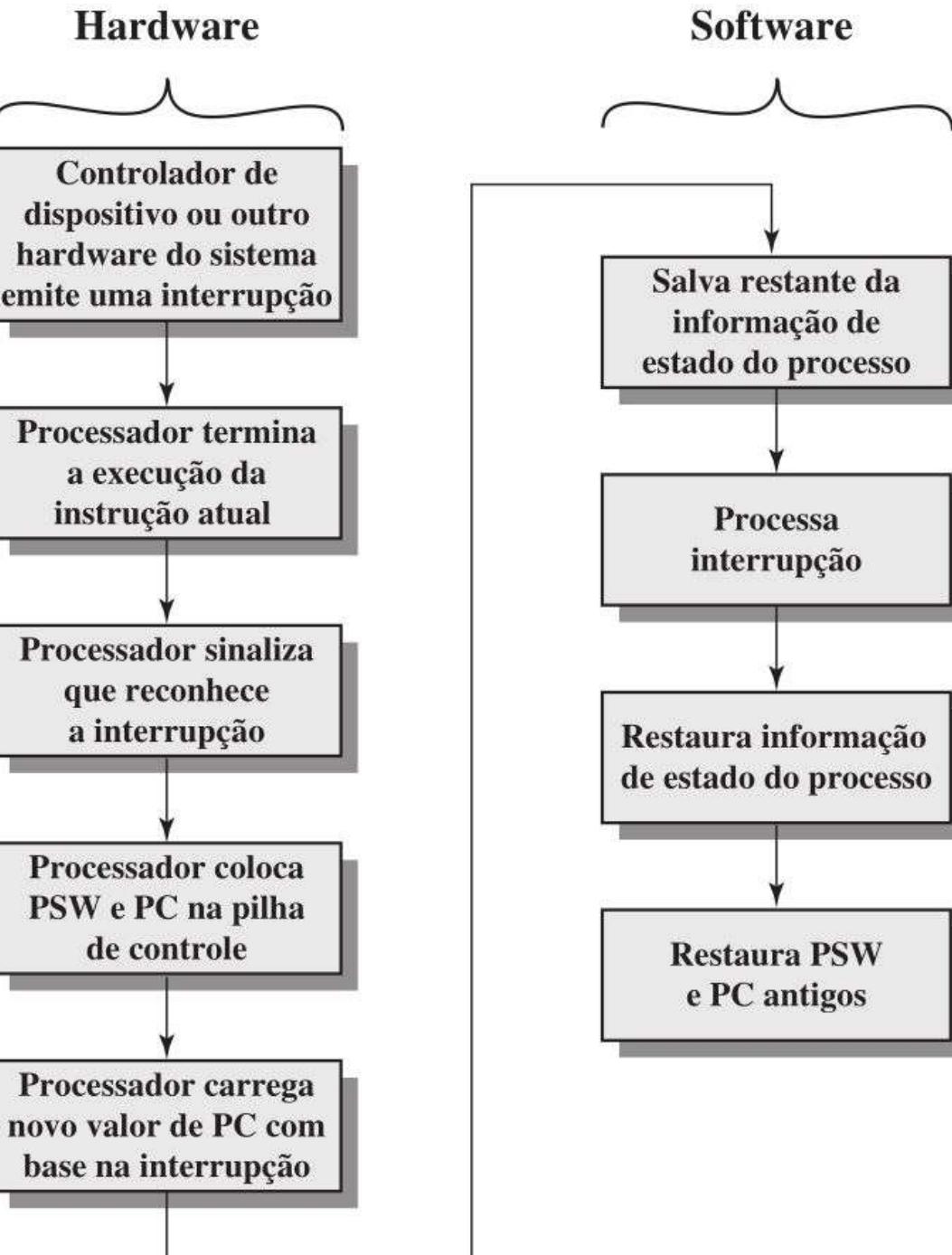
Ciclo de Execução de Instruções



Fluxo da E/S Dirigida por Interrupção



Fluxo de Processamento de Interrupção





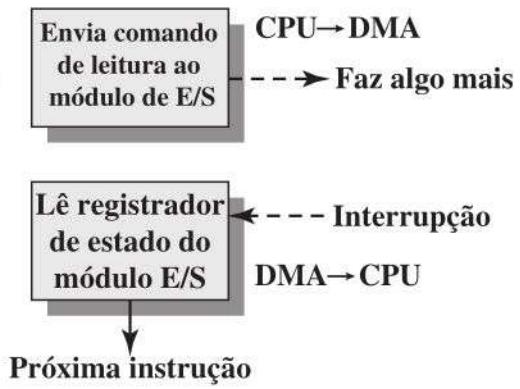
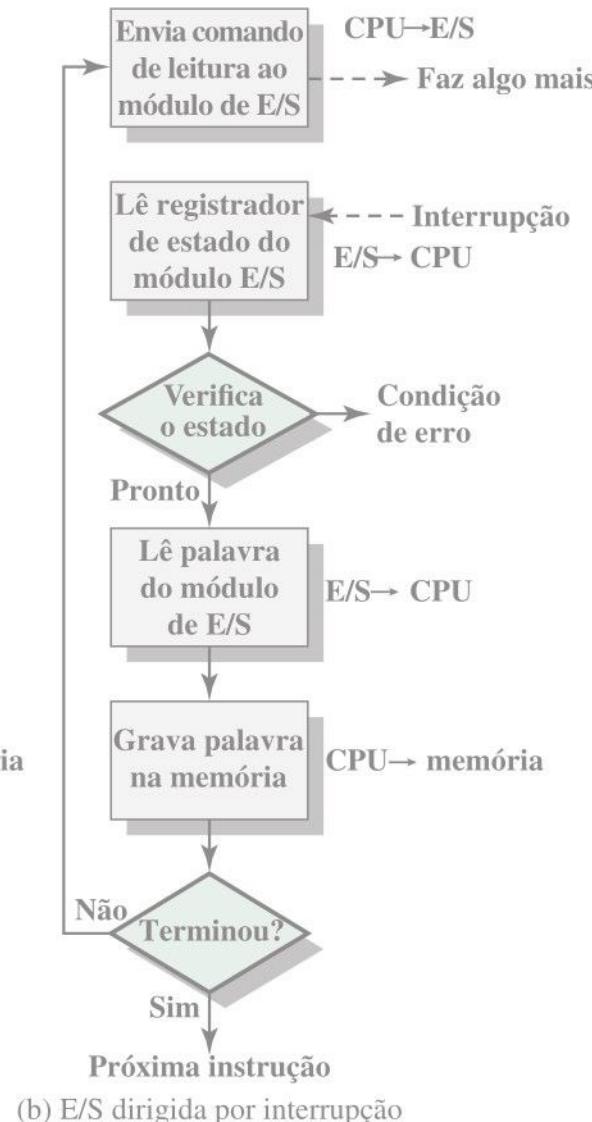
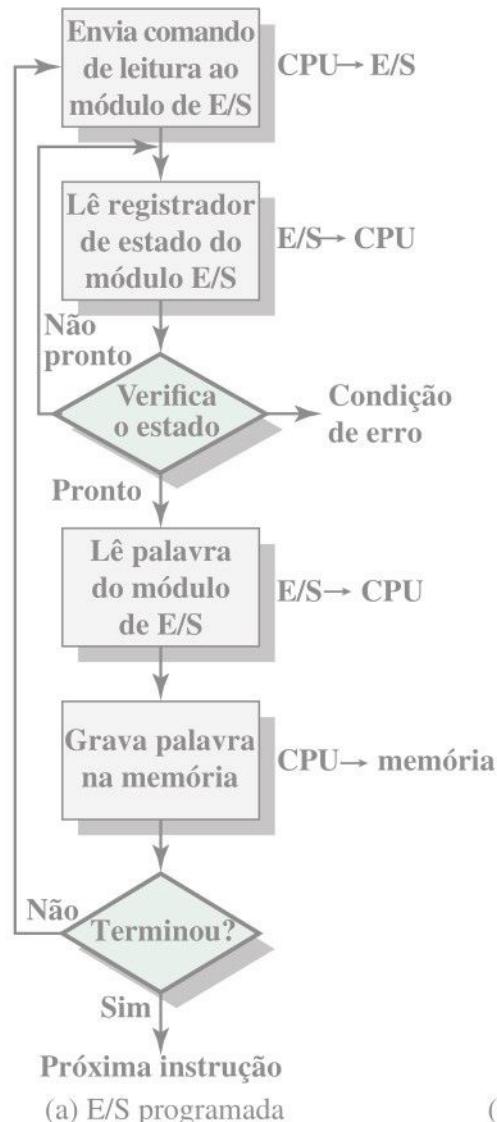
Entrada/Saída

Acesso Direto à Memória (DMA)

Acesso Direto à Memória (DMA)

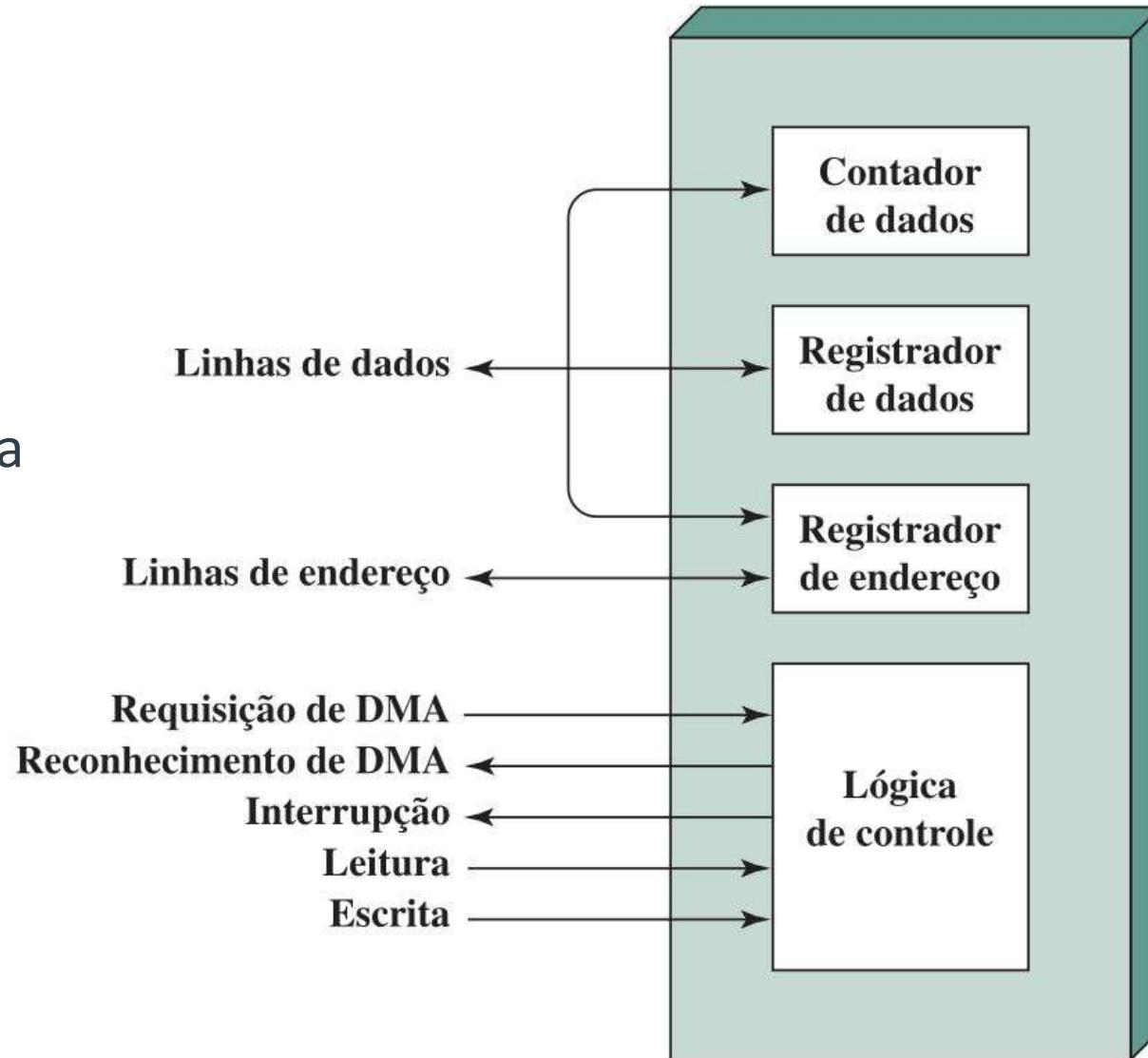
- Desvantagens das estratégias de E/S anteriores:
 - ..ambas exigem intervenção ativa da CPU
 - A taxa de transferência é limitada
 - A CPU está ocupada
- DMA é a resposta!
 - Módulo adicional (*hardware*) no barramento
 - O controlador DMA assume o controle da CPU para E/S
 - CPU apenas requisita transferência de n bytes para a memória
 - DMA avisa a CPU ao final da transferência (interrupção)

Fluxo do Acesso Direto à Memória



Função do Controlador de DMA

- CPU primeiro solicita transferência
 - Quantidade de dados
 - Endereço de memória (origem/destino)
- Após isso realiza algum processamento
- Controlador de DMA trata da transferência
 - Lê dispositivo de E/S e escreve na memória
 - Ou o contrário
 - Emite sinal de interrupção quando finalizada



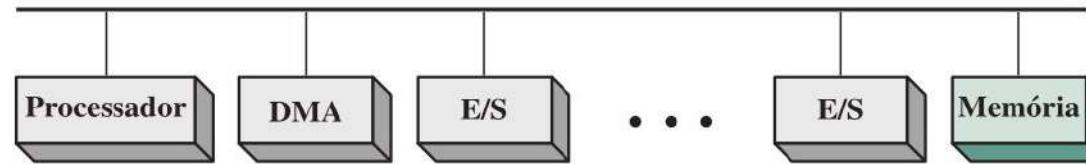
Exemplo: E/S com Acesso Direto à Memória (DMA)

- Suponha que o endereço do registrador de leitura de dados (**DATAIN**) da controladora do disco seja **0x4000_0000**.
- Queremos ler **16 bytes** para o endereço **0x8000_1000** da **RAM**.
- Quando finalizar, faremos o mesmo para o endereço **0x8000_2000**.

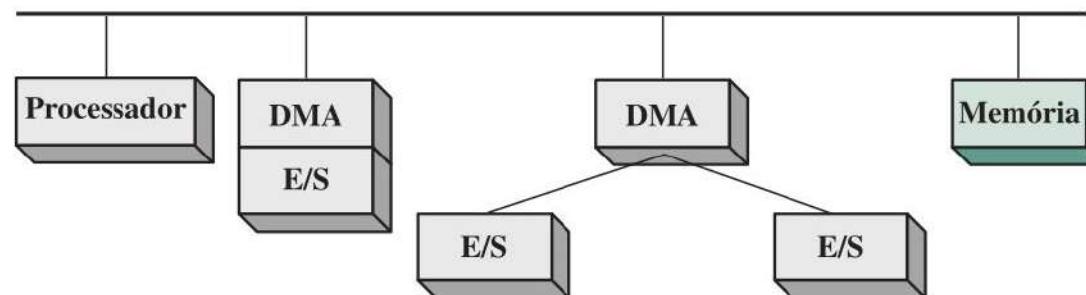
```
// E/S Dirigida por DMA
void InterruptServiceRoutine() {
    DMAStartRead(0x4000_0000, 0x8000_2000, 16);
}

int main(void) {
    DMAStartRead(0x4000_0000, 0x8000_1000, 16);
    DoSomethingElse();
}
```

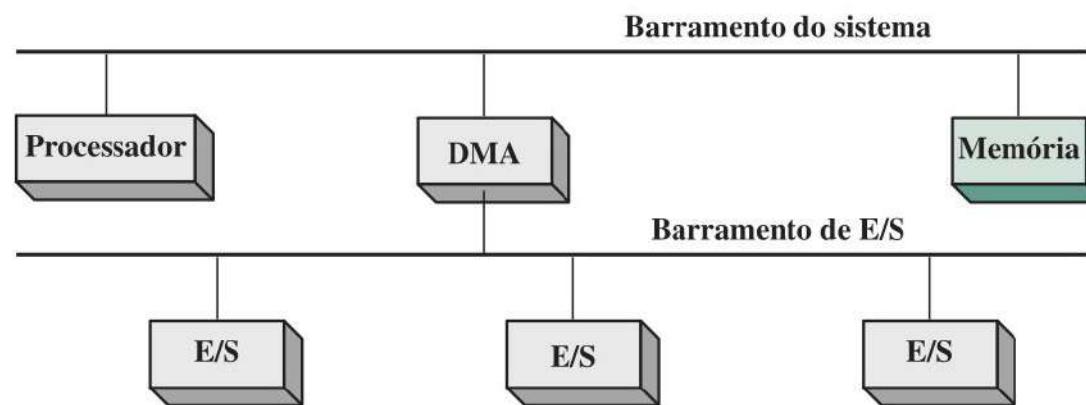
Configurações do DMA



(a) Único barramento, DMA separado

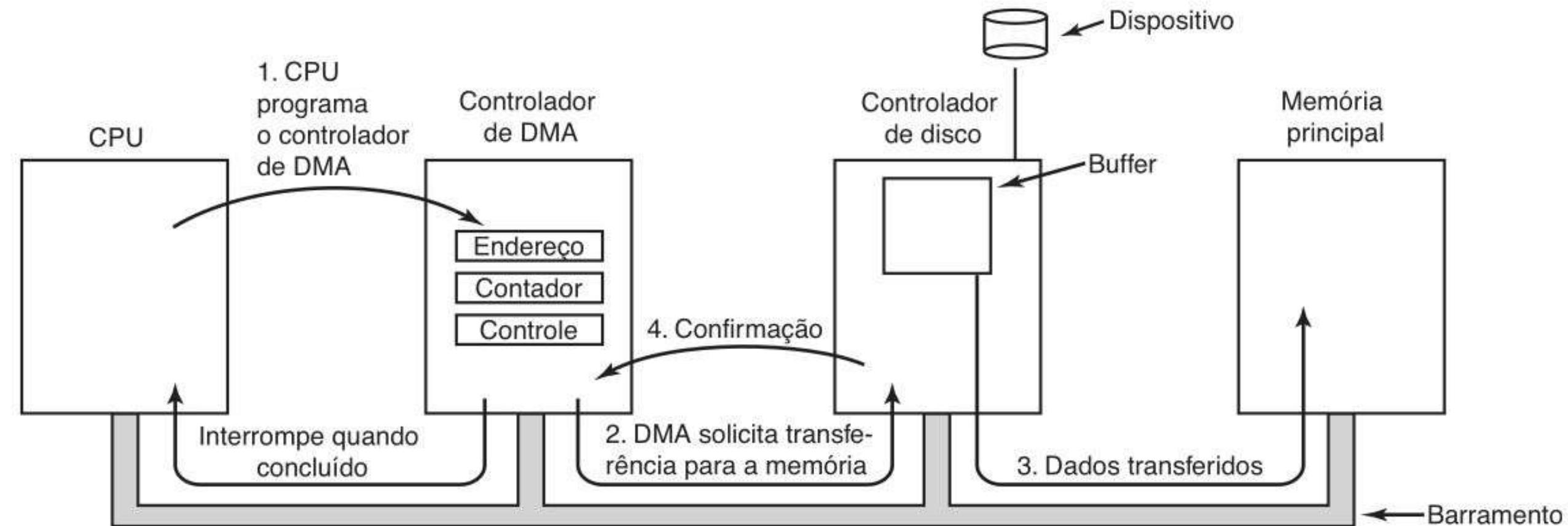


(b) Único barramento, DMA-E/S integrados

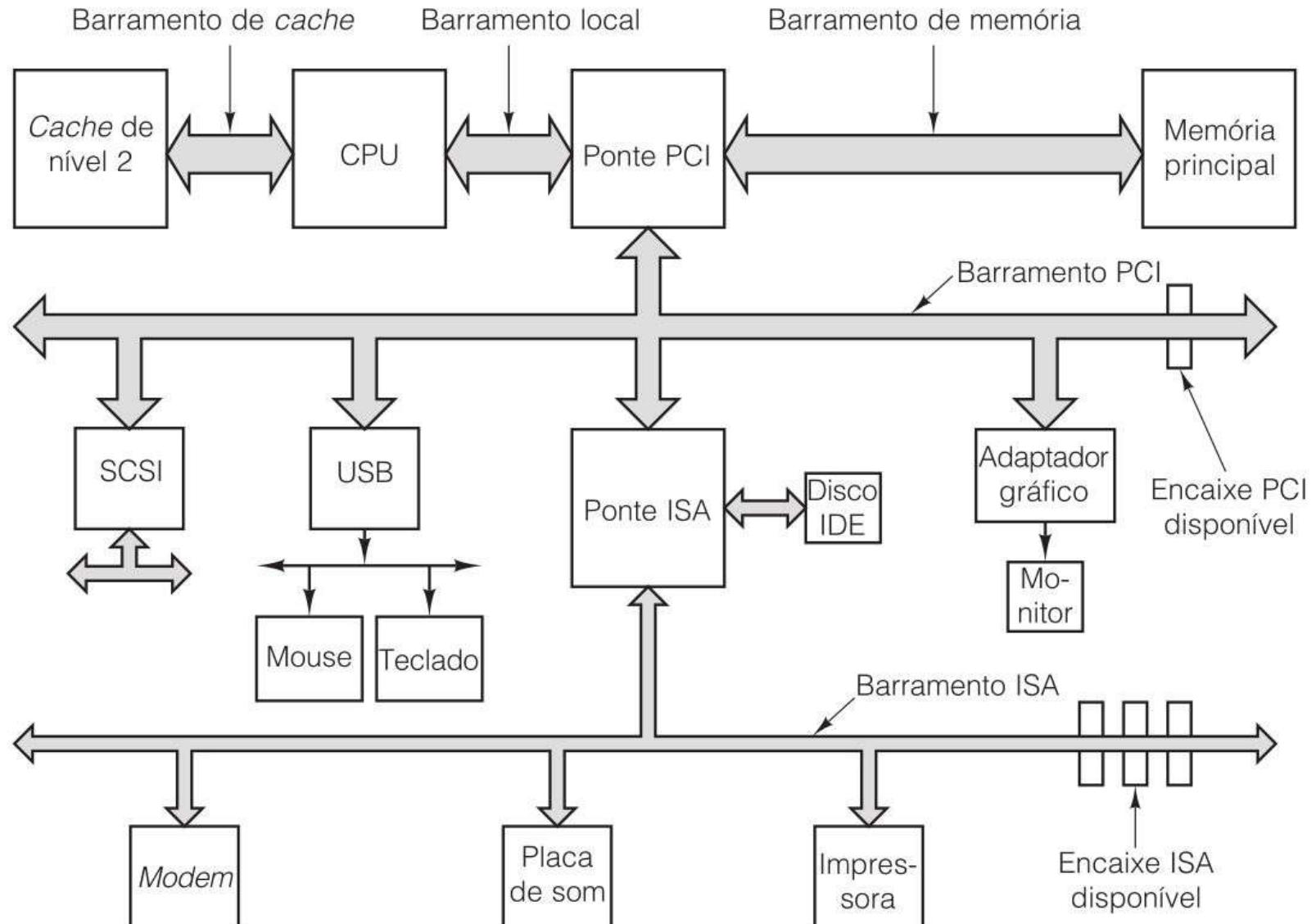


(c) Barramento de E/S

Exemplo: DMA na Lida do Disco

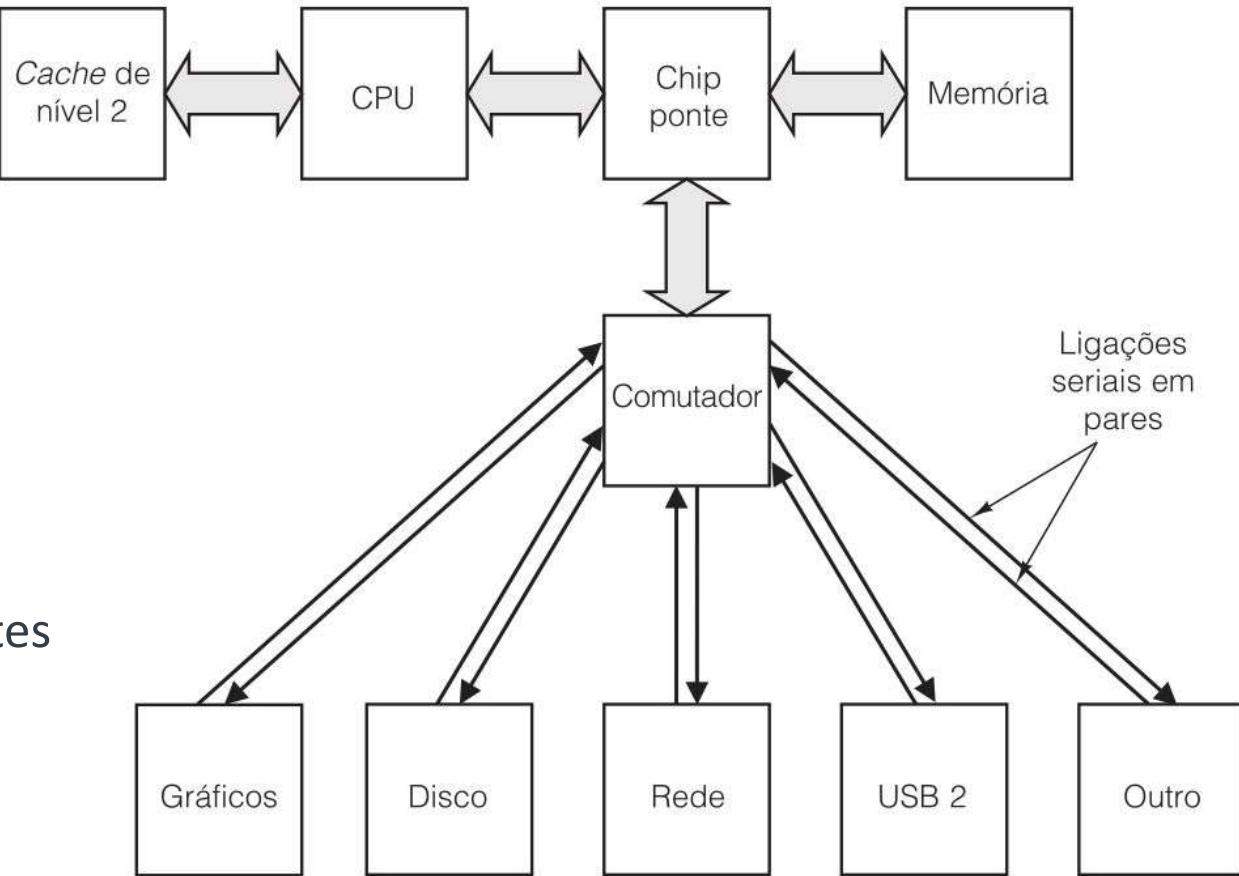


Barramento de E/S separado no PCI



DMA em Barramentos Modernos

- Resolvem o problema de monopólio do DMA sobre a RAM
 - Ocorre sistemas mais simples e.g. AVR
- Memória e Barramento suportam acesso concorrente
 - Arbitração e múltiplos bancos de memória
- **PCI Express** permite acesso simultâneo*
 - Avançada **arbitração** e **controle de fluxo**
 - Controlador PCIe controla operações via pacotes



* (Acesso à diferentes regiões de memória)

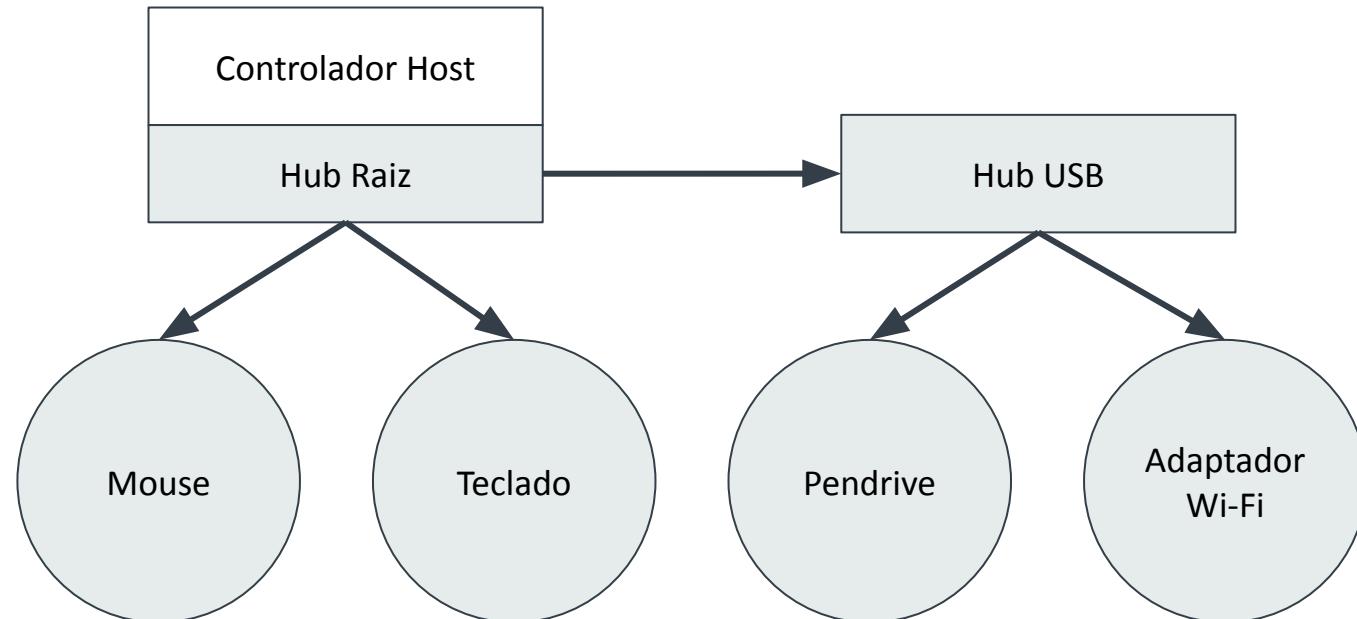


Entrada/Saída

Padrões de Interconexão Externa

Barramento Serial Universal (USB)

- Interface padrão para dispositivos de **baixa velocidade** e.g. teclado e mouse
 - Também usada para E/S de **alta velocidade** e.g. unidades de armazenamento e adaptadores de rede
 - Remove a necessidade de interfaces específicas, caras e nada práticas e.g. ISA, PCI e PCIe
- Várias gerações: USB4 permite taxas de até 40 Gbps
- Controlador *host* raiz: Conectado aos dispositivos USB (permite *plug-and-play*)
 - Cria uma rede local com topologia hierarquia de árvore



Exemplo: HUB USB com vários Dispositivos

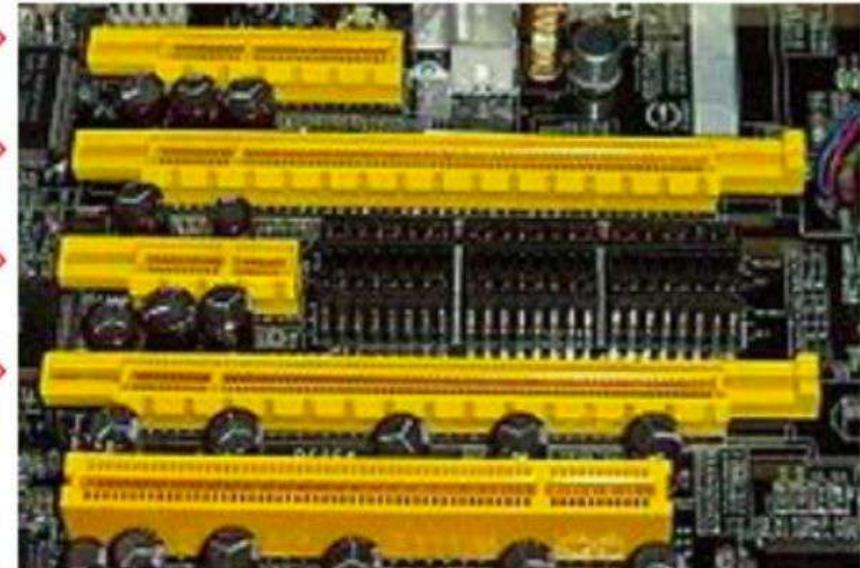


PCI Express

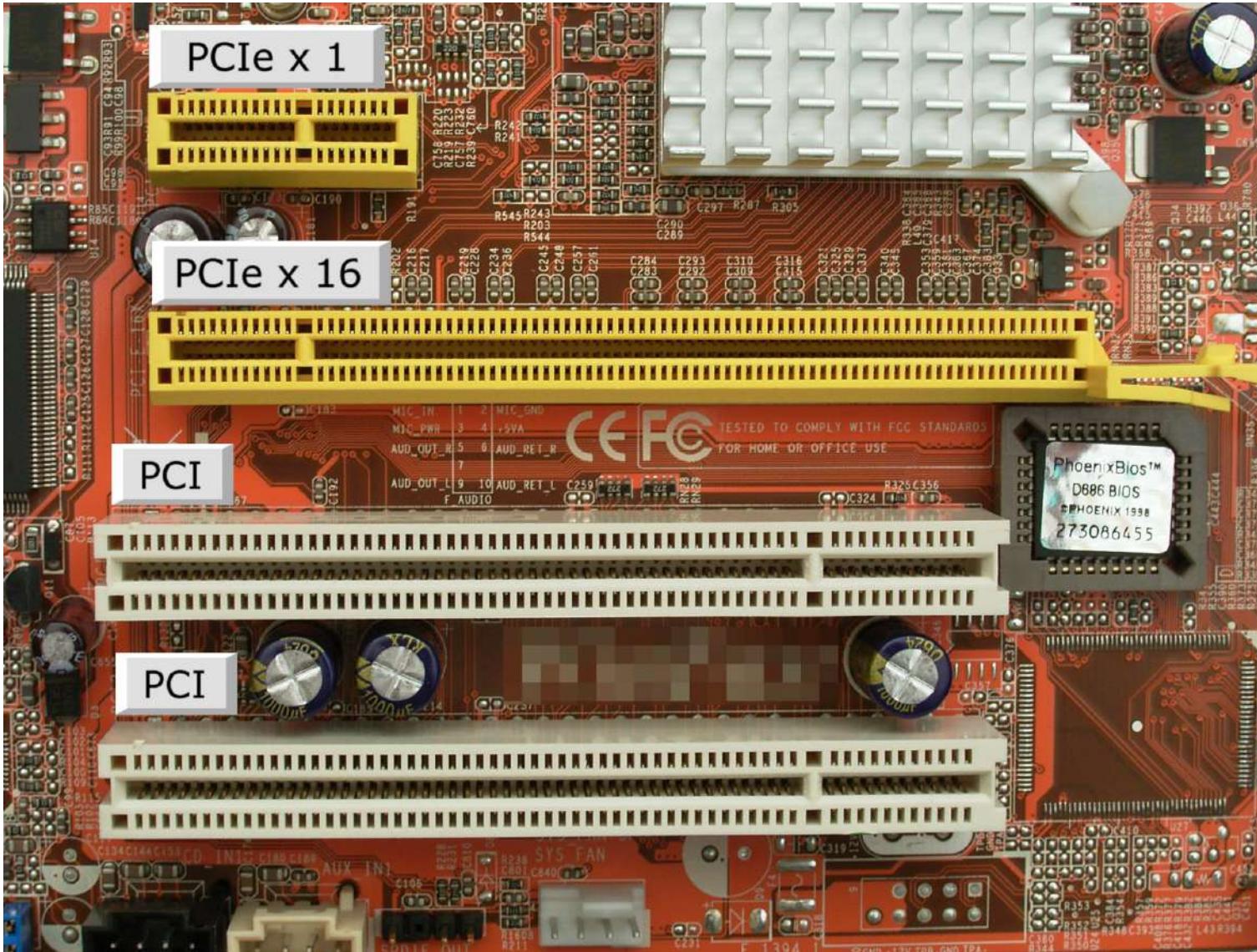
- Barramento de alta velocidade: Conecta periféricos variados à placa-mãe
 - Substituiu o PCI (*Peripheral Controller Interface*): Barramento paralelo ultrapassado
- “Rede” ponto-a-ponto baseada em pacotes: Arquitetura de Pacotes
 - Pares de linhas seriais (full duplex): Permite até 32 *lanes* assíncronas
 - Suporta altas transferências: 512GB/s no PCIe 7.0 x16 (limite teórico)
- Aula sobre PCI Express



PCI Express ×4 →
PCI Express ×16 →
PCI Express ×1 →
PCI Express ×16 →



Exemplo: Conectores PCI e PCI Express



Velocidade de Transferência no PCI Express

- Em comparação, o PCI alcançava 528MB/s, transferindo 64 bits em paralelo a 66MHz.

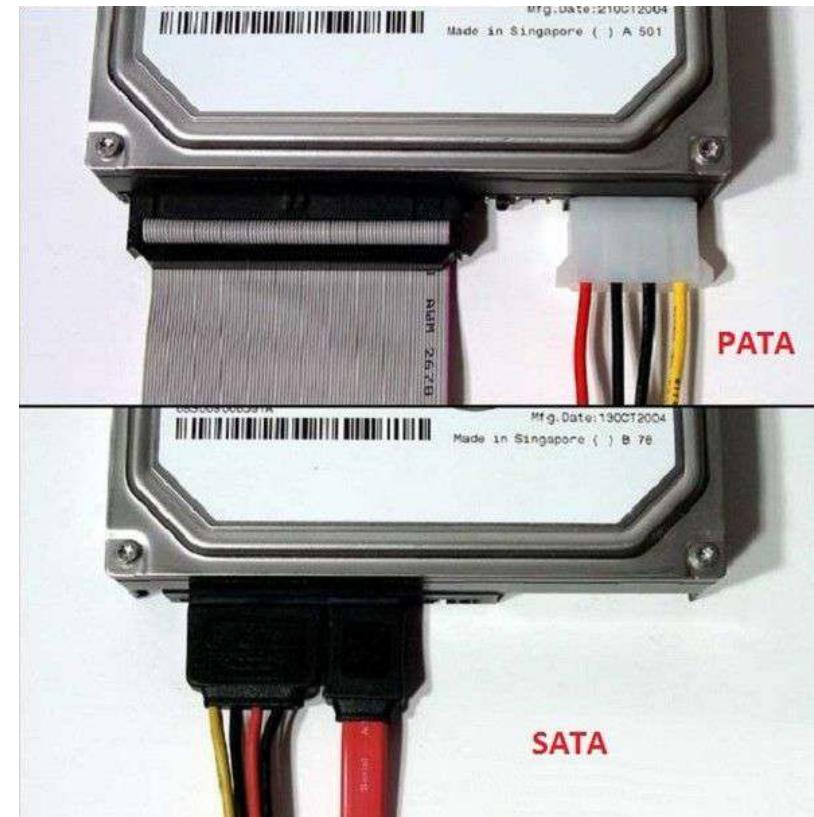
Revision	Max Data Rate	Encoding	Signaling
PCIe 7.0 (2025)	128.0 GT/s	1b/1b (Flit Mode*)	PAM4
PCIe 6.0 (2022)	64.0 GT/s	1b/1b (Flit Mode*)	PAM4
PCIe 5.0 (2019)	32.0 GT/s	128b/130b	NRZ
PCIe 4.0 (2017)	16.0 GT/s	128b/130b	NRZ
PCIe 3.0 (2010)	8.0 GT/s	128b/130b	NRZ
PCIe 2.0 (2007)	5.0 GT/s	8b/10b	NRZ
PCIe 1.0 (2003)	2.5 GT/s	8b/10b	NRZ

	Bandwidth	Giga transfer	Frequency	Encoding
PCIe 3.0	32 GB/s	8 GT/s	8.0 GHz	128 b/130b
PCIe 4.0	64 GB/s	16 GT/s	16.0 GHz	128 b/130b
PCIe 5.0	128 GB/s	32 GT/s	32.0 GHz	128 b/130b

Largura de banda máxima usando PCIe x16

Advanced Technology Attachment (ATA)

- Interface para sistemas de armazenamento de disco
- **PATA / IDE (*Parallel ATA*):** Transmissão paralela de 16-bits
 - Baixa velocidade, com grande tamanho e cabos rígidos
- **SATA (*Serial ATA*):** Transmissão serial ponto-a-ponto em dois pares de fios
 - Dispositivos e cabos menores: Permite **hot swap** (substituir HD sem precisar desligar o computador)
 - Taxas de transferência teóricas:
 - **SATA I:** 1.5 Gbps (\approx 150 MB/s)
 - **SATA II:** 3 Gbps (\approx 300 MB/s)
 - **SATA III:** 6 Gbps (\approx 600 MB/s)
 - HD Externos usam um conversor SATA-USB
 - Permite até 5 Gbps no USB 3.0



SAS (Serial Attached SCSI)

- Outra interface para sistemas de armazenamento de disco
- Transmissão serial **full duplex**: Ponto-a-ponto
 - Substituiu o SCSI (*Small Computer System Interface*)
 - Compatível com SATA: Aplicável em servidores corporativos, data centers e ambientes RAID
 - Taxas por geração:
 - **SAS 1.0**: 3 Gbps
 - **SAS 2.0**: 6 Gbps
 - **SAS 3.0**: 12 Gbps
 - **SAS 4.0**: 22.5 Gbps





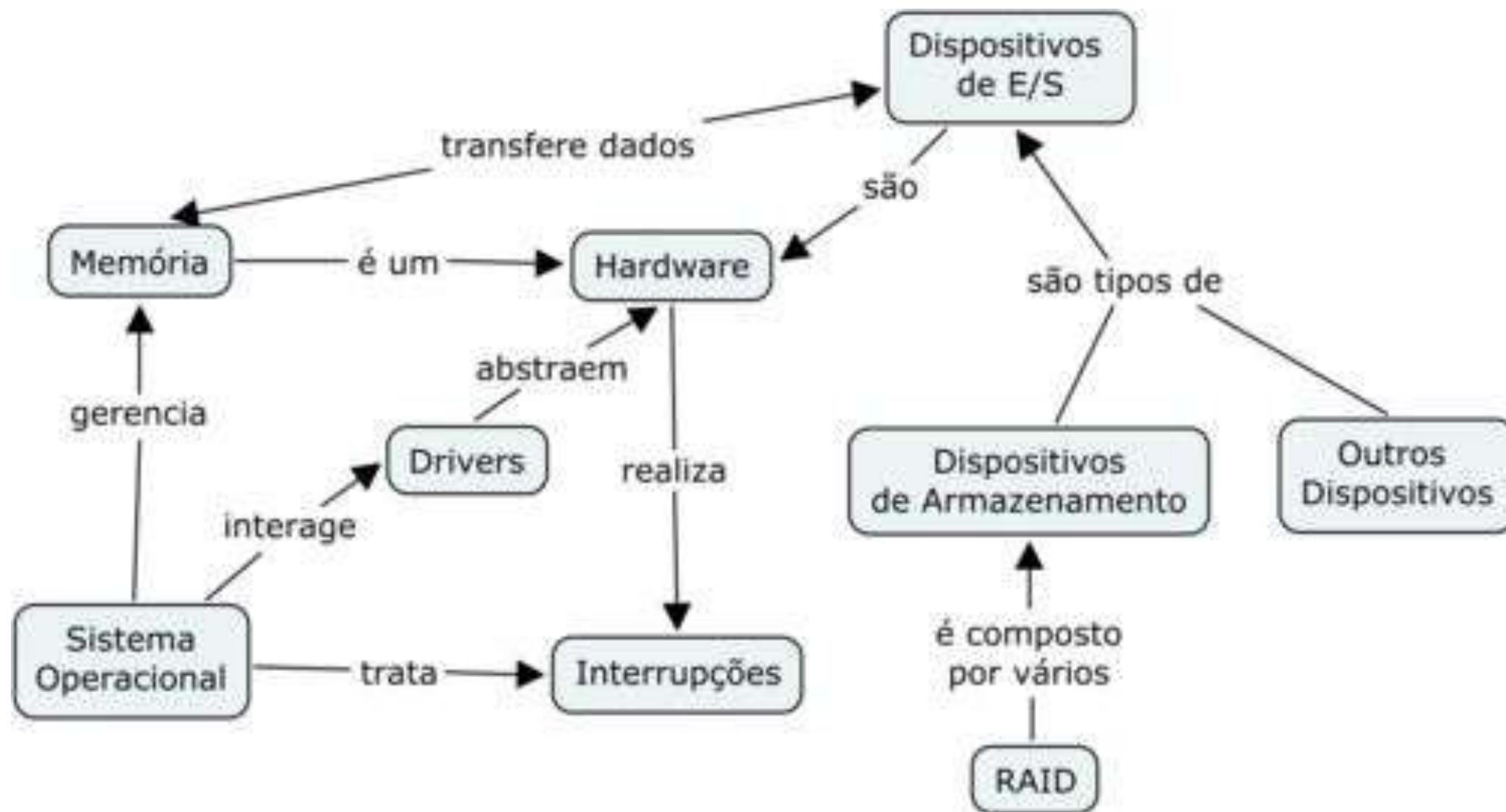
Entrada/Saída

Conclusão

Resumo da Aula

- Dispositivos Externos: Realizam funções externas ao computador e.g. áudio, vídeo
- Módulos de E/S: Controlam dispositivos externos, realizando interface com a CPU
- Três Técnicas de E/S:
 - E/S Programada (*Polling*): CPU **espera ativamente** o módulo de E/S ficar pronto para transferir
 - E/S Dirigida por Interrupções: Módulo de E/S **interrompe** a CPU quando pronto
 - Acesso Direto à Memória (DMA): Controlador de DMA transfere dados do módulo de E/S **diretamente** para a memória
- Padrões de Interconexão Externa: Suportam periféricos em computadores e.g. USB

Mapa Resumo



Conclusão

- Nessa Aula:
 - Entrada/Saída
- Bibliografia Principal:
 - Arquitetura e Organização de Computadores; Stallings, W.; 10^a Edição (Capítulo 7)
- Próxima Aula:
 - Conjuntos de Instruções: Características e Funções