

Hierarquia de Memória

Parte III

Histórico de revisões

2

Revisão	Data	Responsável	Descrição
0.1	-x-	Prof. Cesar Zeferino	Primeira versão
0.2	03/2017	Prof. Cesar Zeferino	Revisão do modelo
0.3	06/2020	Prof. Cesar Zeferino	Atualização da bibliografia

Observação: Este material foi produzido por pesquisadores do Laboratório de Sistemas Embarcados e Distribuídos (LEDS – Laboratory of Embedded and Distributed Systems) da Universidade do Vale do Itajaí e é destinado para uso em aulas ministradas por seus pesquisadores.

1 Introdução

☐ Objetivo

- ☐ Conhecer os princípios do funcionamento da memória virtual

☐ Conteúdo

- ☐ Introdução à memória virtual
- ☐ Tradução de endereços virtuais
- ☐ Paginação
- ☐ Translation Lookaside Buffer
- ☐ Proteção

Introdução

4

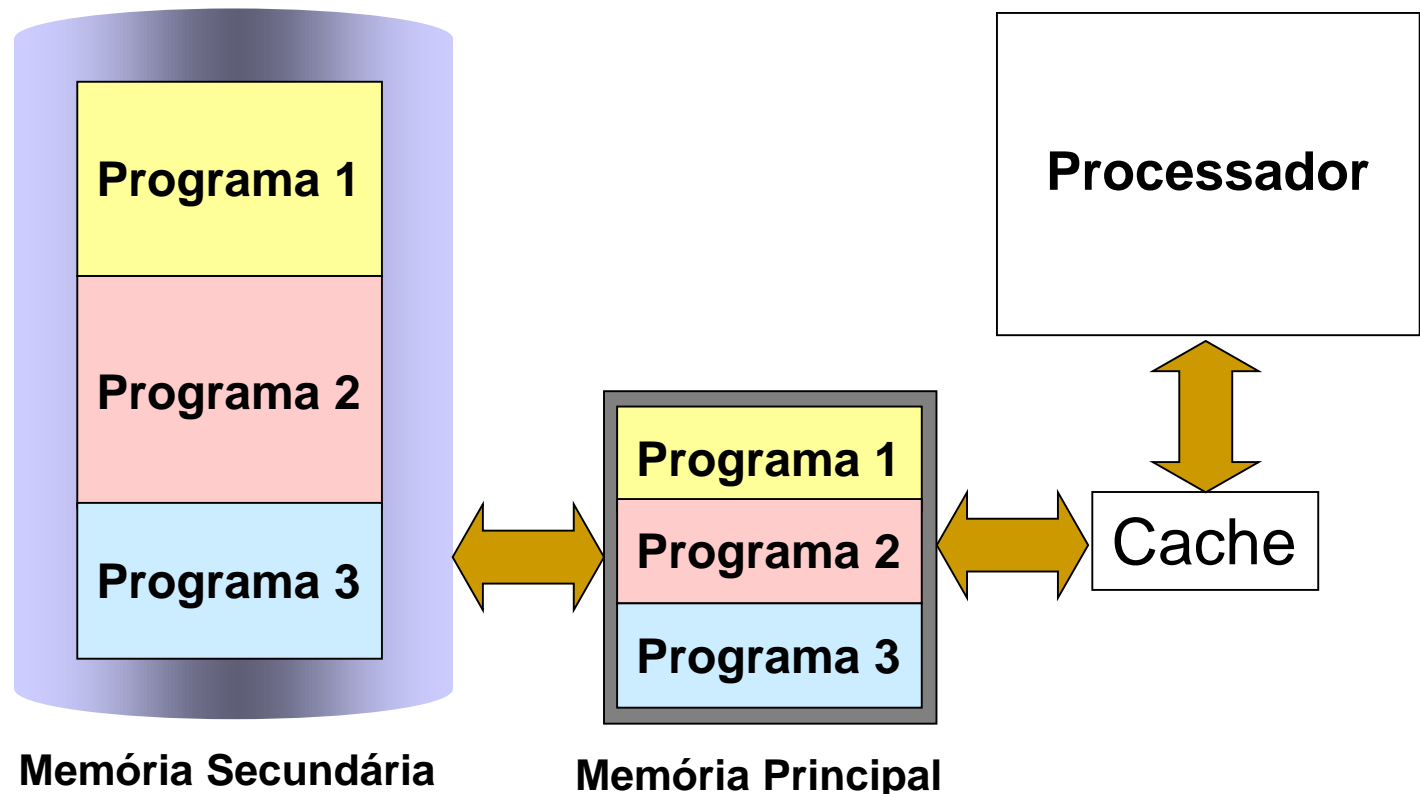
❑ Bibliografia

- ❑ PATTERSON, David A.; HENNESSY, John L. Grande e rápida: explorando a hierarquia de memória. *In*: _____. **Organização e projeto de computadores**: a interface hardware/software. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2014. cap. 5.
- ❑ Edições anteriores
 - ❑ Patterson e Hennessy (2005, cap. 7)
 - ❑ Patterson e Hennessy (2000, cap. 7)

Introdução

❑ Motivação para memória virtual

- ❑ Permitir o compartilhamento seguro e eficiente da memória entre vários programas em um sistema multitarefa
- ❑ Lidar de maneira facilitada com o fato de que a memória principal é tipicamente menor que o espaço exigido pelos programas



Introdução

6

❑ Definição de memória virtual

- ❑ A memória virtual é uma forma de permitir ao software utilizar mais memória que o computador possui fisicamente
- ❑ Ela consiste de um conjunto de alterações no projeto do hardware combinadas a alterações no projeto do sistema operacional.
- ❑ Tecnicamente falando, ela permite ao programa executar em um espaço de memória cujo tamanho não é necessariamente limitado ao tamanho da memória física do computador

Introdução

❑ Espaço de endereçamento x Memória Física

Largura do endereço	Tamanho do Espaço de Endereçamento
16 bits	64 KB
32 bits	4 GB
64 bits	16 EB

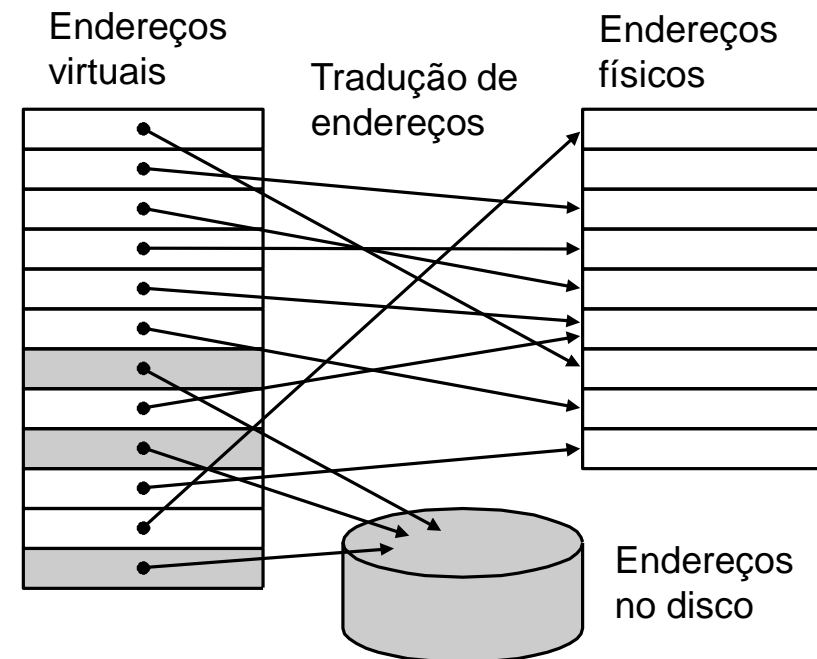
- ❑ Configuração típica de sistemas de memória em 2015
 - ❑ Memória Principal: 4 a 8 GB
 - ❑ Memória Secundária: 0,5 a 1 TB

onde

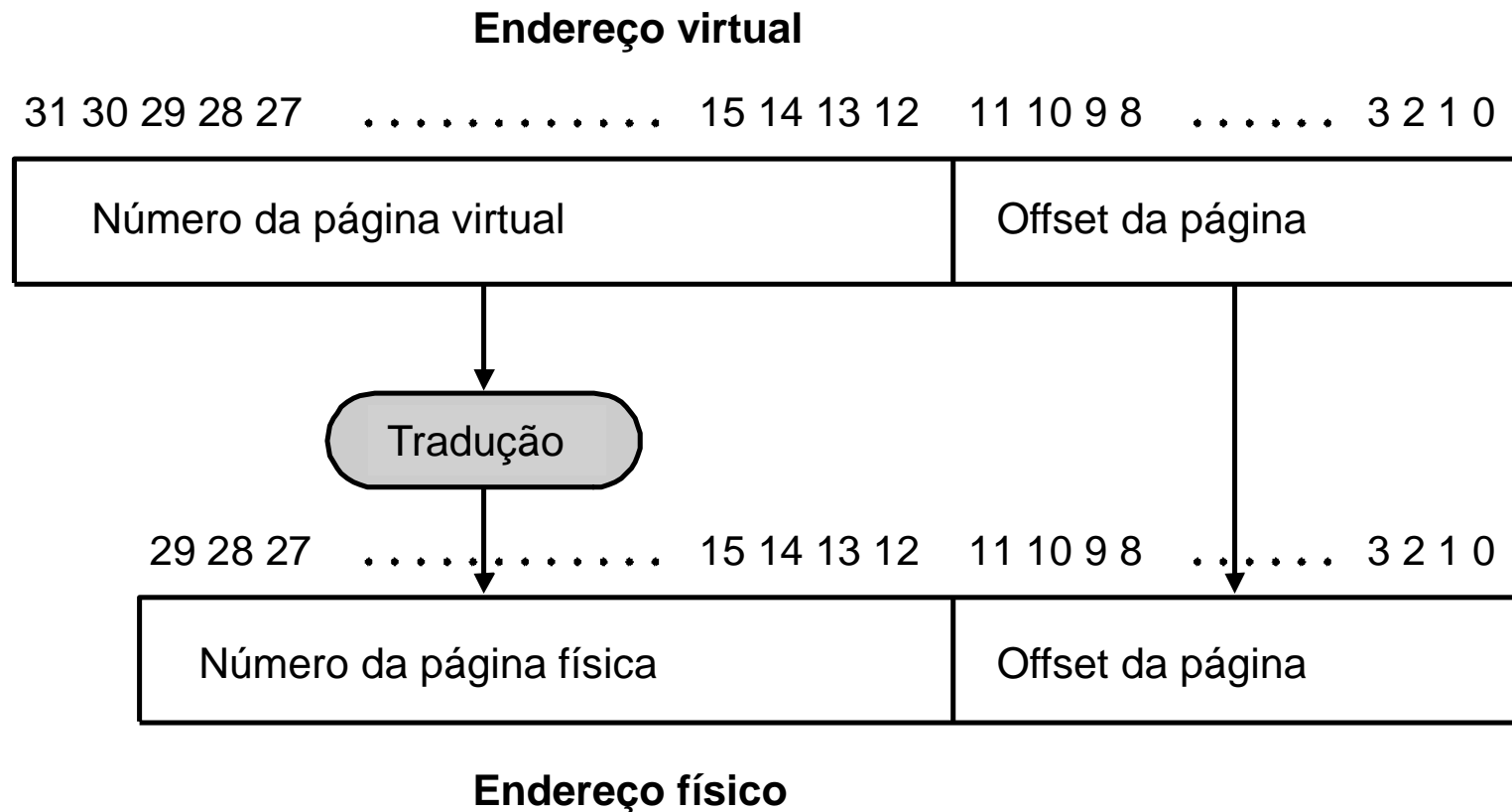
Prefixo	10^n
Quilo (K)	10^3
Mega (M)	10^6
Giga (G)	10^9
Tera (T)	10^{12}
Peta (P)	10^{15}
Exa (E)	10^{18}
Zetta (Z)	10^{21}
Yotta (Y)	10^{24}

Funcionamento básico da memória virtual

- ❑ O espaço de endereçamento do programa é organizado em blocos de tamanho fixo, denominados **páginas**, que são mapeados de um conjunto de **endereços virtuais** em um conjunto de **endereços físicos** na memória real que também é dividida em páginas
- ❑ Uma página virtual pode estar mapeada em uma página da memória principal ou armazenada na memória secundária
- ❑ As páginas físicas podem ser compartilhadas fazendo dois endereços virtuais apontarem para o mesmo endereço físico, o que permite que dois programas compartilhem dados ou códigos



Mapeando um endereço virtual em um end. físico



Exemplo

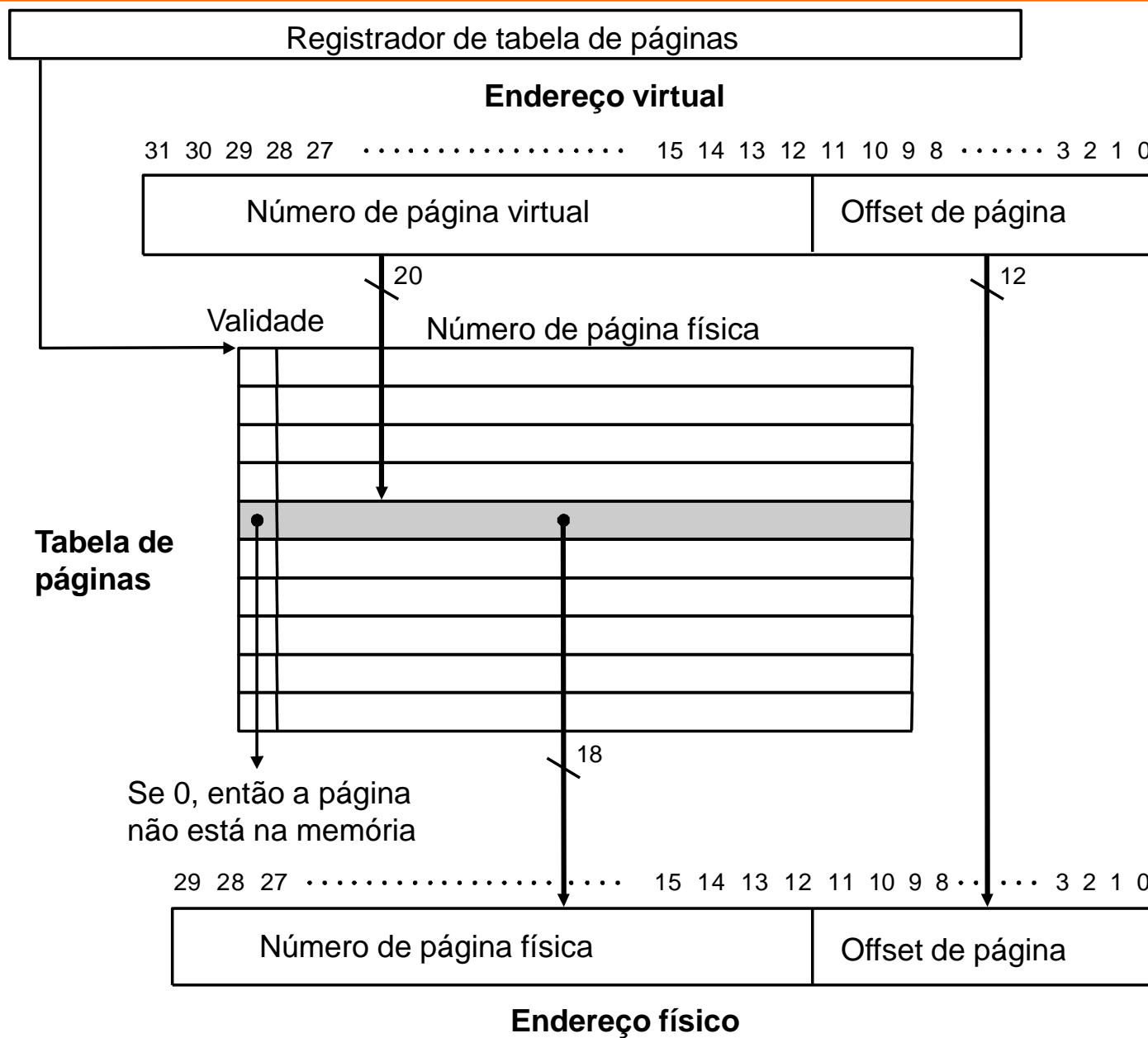
- ❑ Tamanho da página = 4 KB = 2^{12}
- ❑ Número de páginas físicas = 2^{18}
- ❑ Tamanho máximo da memória física = 1 GB = 2^{30}
- ❑ Tamanho do espaço de endereços virtuais = 4 GB = 2^{32}

Escolhas de projeto em sistemas de memória virtual

10

- ❑ **Restrição:** alto custo de uma falta de página (milhões de ciclo de clock do processador)
- ❑ **Decisões importantes**
 - ❑ As páginas devem ser grande o bastante para amortizar o tempo de acesso (ex. 4-64 KB em desktops e servidores, mas 1 KB em sistemas embarcados)
 - ❑ O mapeamento é totalmente associativo para reduzir a taxa de falta de páginas
 - ❑ As faltas de página podem ser tratadas em nível de software pois o overhead é pequeno se comparado ao tempo de acesso ao disco
 - ❑ Escritas na memória do tipo write-back

Posicionando e localizando uma página



Processo

❑ Definição de processo

- ❑ Quando um programa está em execução, o PC, os registradores e a tabela de página definem o estado do programa, que é denominado processo

❑ Processo ativo ou inativo

- ❑ Um processo é dito ativo quando está de posse do processador (se não, é inativo)

❑ Chaveamento de tarefas

- ❑ Quando o sistema operacional (SO) realiza o chaveamento de tarefas, o estado do programa que perde o processador deve ser preservado para poder ser restaurado quando ele receber o processador novamente

❑ Salvamento de contexto (preservando o processo)

- ❑ Como cada programa possui sua própria tabela de páginas, o SO precisa salvar apenas o registrador de tabela de página, além do PC e dos demais registradores

Relocação

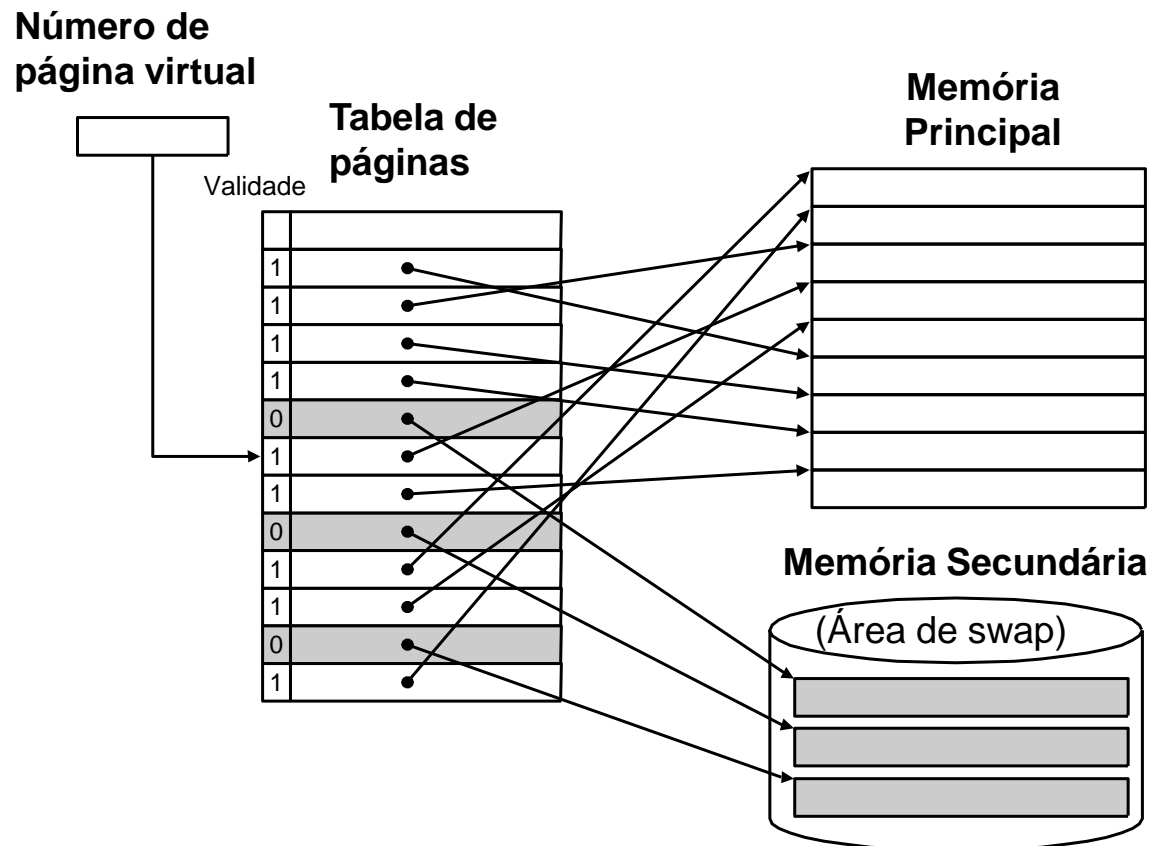
13

- ❑ A memória virtual simplifica o carregamento de programas
- ❑ Por meio da relocação, os endereços virtuais usados por um programa são mapeados para diferentes endereços físicos antes que sejam usados para acessar a memória
- ❑ A relocação permite carregar um programa em qualquer lugar na memória principal

Faltas de página

14

- Um página virtual pode estar mapeada para uma página física na memória principal (valid. = 1) ou não (valid. = 0), nesse caso, sendo mantida em uma área do disco denominada área de swap



Faltas de página

❑ Falta de página

- ❑ Quando um endereço de uma página virtual que não está na memória principal é acessado, ocorre uma falta de página

❑ Busca da página

- ❑ Na falta de uma página, ela tem que ser trazida do disco para a memória principal

❑ Substituição de página

- ❑ Se todas as páginas físicas já estiverem ocupadas, então o SO terá que escolher uma delas para ser substituída, a qual será colocada na área de swap

❑ Esquema de substituição

- ❑ A escolha da página a ser substituída é tipicamente baseada no esquema LRU (Least Recently Used), em que a página usada menos recentemente é escolhida

❑ Bit de referência (ou de uso)

- ❑ Cada página possui um bit de referência que é ligado quando a página é acessada. O SO zera todos os bits periodicamente

Tamanho da tabela de páginas

16

❑ Tamanho máximo de uma tabela de páginas

- ❑ Endereço virtual de 32 bits e página de 4 KB (2^{12})
- ❑ Número de entradas = $2^{32} - 2^{12} = 2^{20} = 1\text{M}$
- ❑ Tamanho de cada entrada = 4 Bytes

Tamanho da tabela de páginas = $1\text{M} \times 4 \text{ Bytes} = 4 \text{ MBytes}$

❑ Reduzindo o custo da tabela de páginas

1. Usar um registrador limite e aumentar a tabela dinamicamente conforme a necessidade do processo
2. Usar mapeamento de dois níveis, mapeando grandes grupos de páginas (64 a 256) em segmentos. A tradução de um endereço virtual é feita consultando uma tabela de segmentos que aponta para uma tabela de páginas que aponta para uma página física

Ver alternativas no livro texto

Escrevendo na memória virtual

17

❑ Write-back (ou copy back)

- ❑ Uma página só é atualizada na memória secundária (disco) quando ela é substituída da memória principal
- ❑ Porém ao ser substituída, a página só será copiada para o disco se ela tiver sido modificada
- ❑ Para saber se uma página foi modificada, a tabela de páginas inclui um bit de modificação (*dirty bit*) que é ligado quando uma word é escrita na página

Translation Lookaside Buffer (Cache de tradução)

18

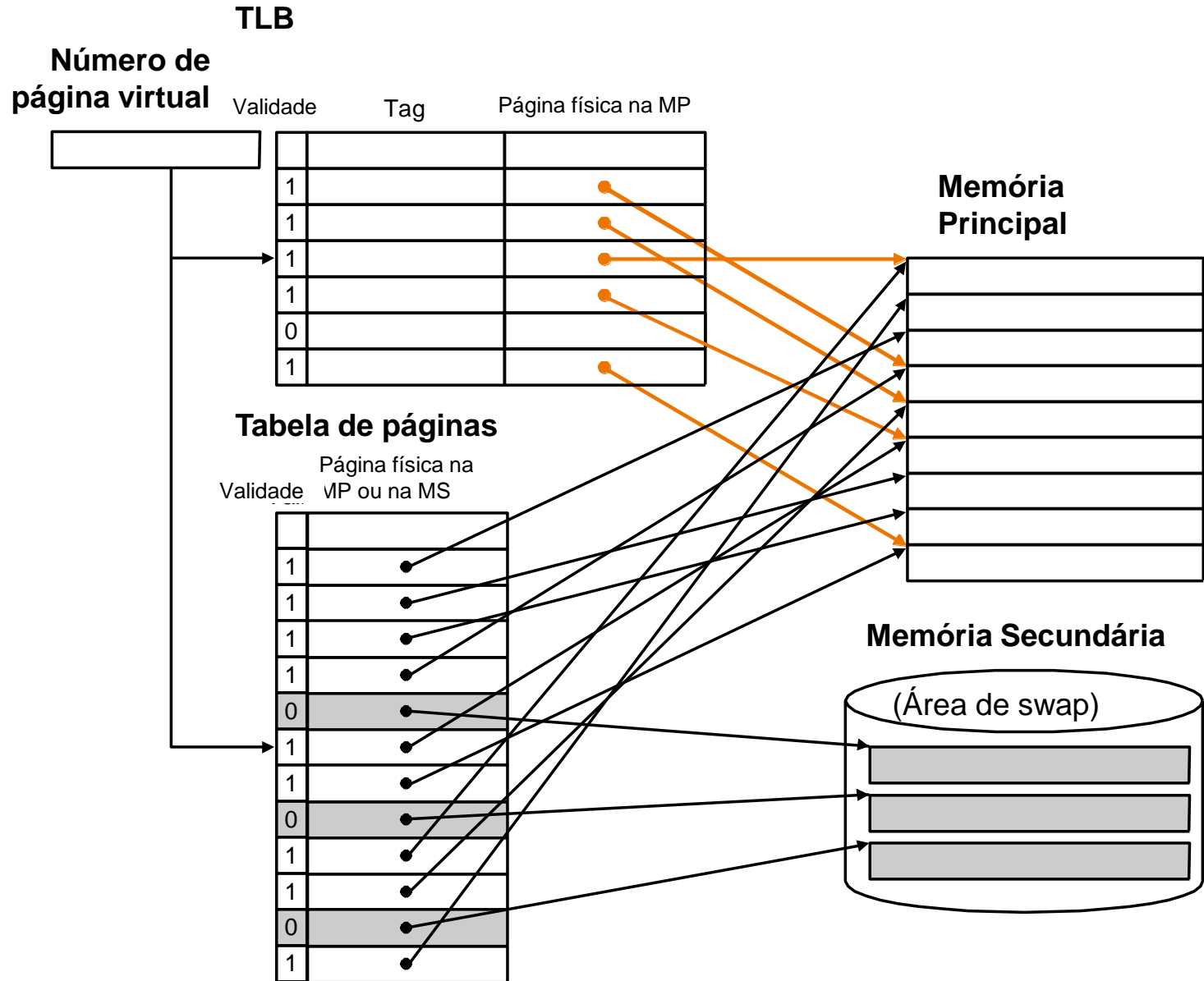
❑ Custo do acesso à memória

- ❑ Qualquer acesso à memória requer pelo menos um acesso adicional para a tradução do endereço virtual

❑ Reduzindo o custo do acesso à memória

- ❑ Com base no princípio da localidade, provavelmente as páginas acessadas recentemente serão novamente em um futuro próximo, e as traduções já realizadas serão necessárias de novo
- ❑ Processadores modernos utilizam uma cache da tabela de páginas apenas para as entradas que mapeiam as páginas físicas
- ❑ Essa cache é denominada TLB – Translation Lookaside Buffer

Translation Lookaside Buffer (Cache de tradução)



Notas:

Embora a figura não ilustre, cada entrada da tabela e do TLB inclui ainda um bit de modificação e um bit de referência.

Em um acesso, podem ocorrer faltas na TLB e faltas na tabela de páginas.

As faltas de TLB são muito mais frequentes que as faltas de página verdadeiras, pois a TLB é muito menor que a tabela de páginas.

Translation Lookaside Buffer (Cache de tradução)

20

❑ Valores comuns de TLBs

❑ Tamanho da TLB

- ❑ 16 a 512 entradas

❑ Tamanho do bloco

- ❑ 1 a 2 entradas de tabela de páginas (4 a 8 Bytes cada uma)

❑ Tempo de acerto

- ❑ 0,5 a 1 ciclo de clock

❑ Penalidade de falta

- ❑ 10 a 100 ciclos de clock

❑ Taxa de faltas

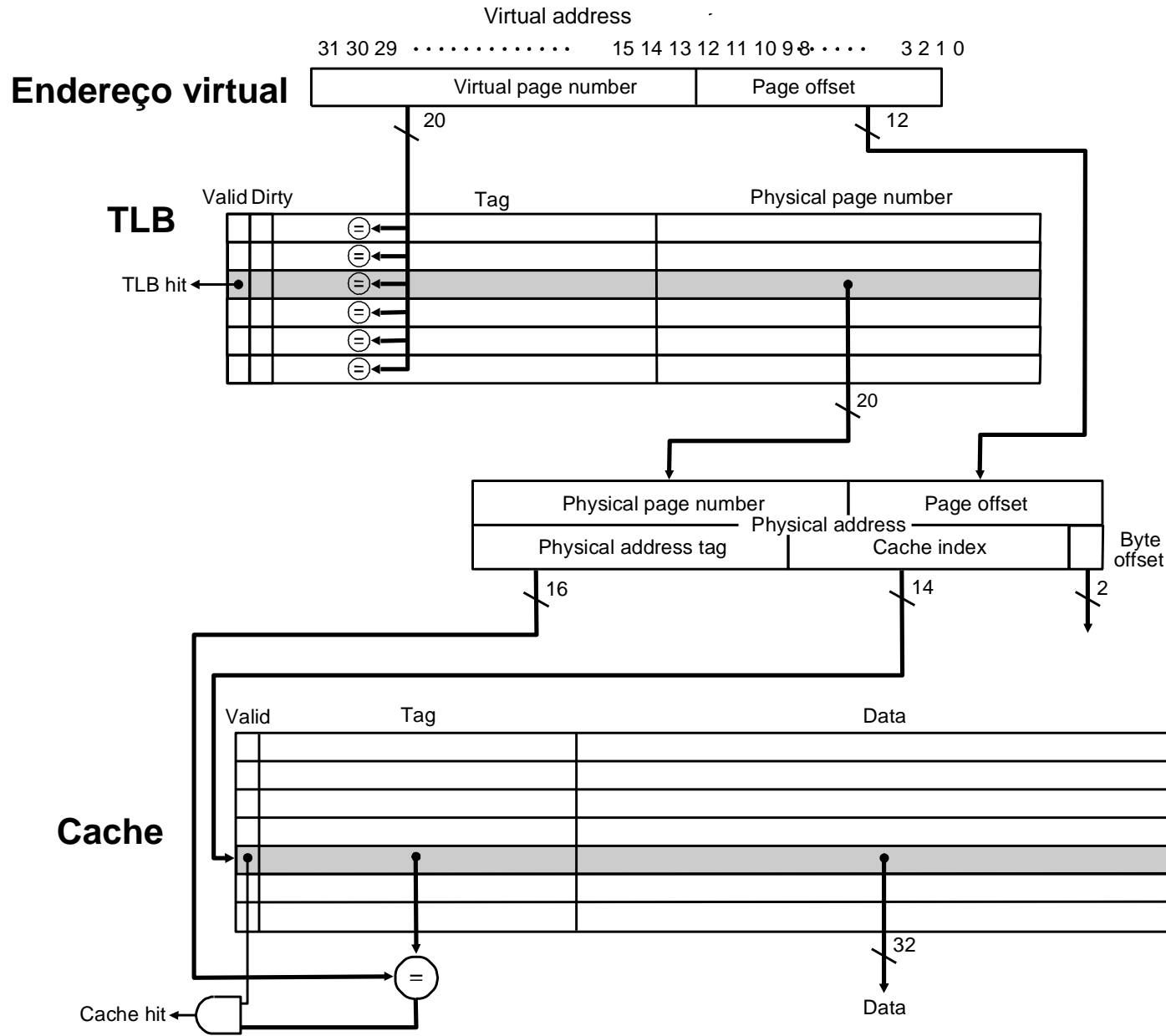
- ❑ 0,01% a 1%

❑ Associatividade

- ❑ Em TLBs pequenas, totalmente associativo
- ❑ Em TLBs grande, associatividade (pequena) por conjunto

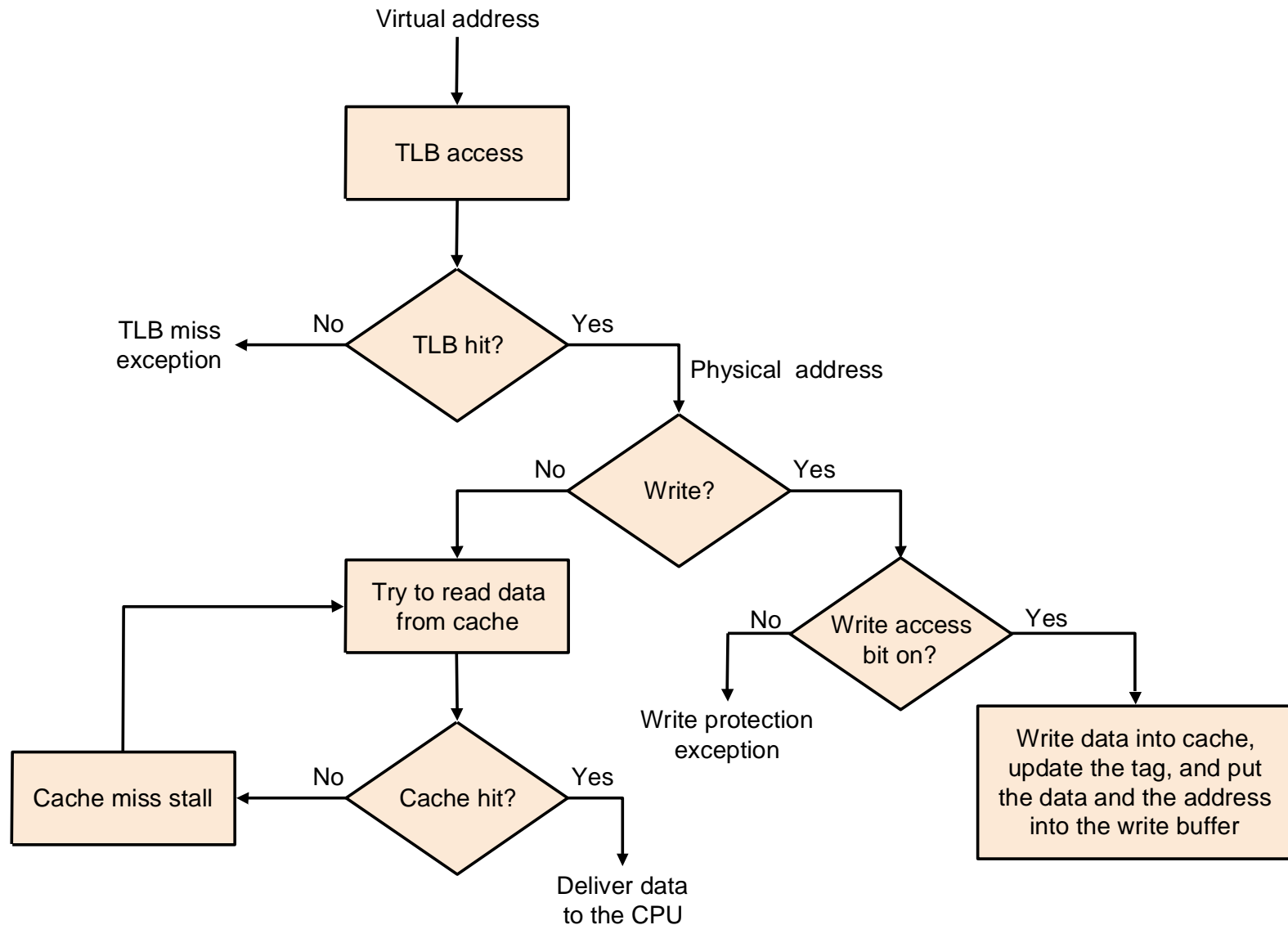
A TLB do MIPS R2000 (usado na DECStation 3100)

21



Processando um acesso na DECStation 3100

22



Implementando proteção com memória virtual

❑ Proteção

- ❑ A memória virtual permite o compartilhamento de uma única memória principal por diversos processos, mas deve impedir que um processo escreva no espaço de endereçamento de outro processo

❑ Hardware deve oferecer um suporte ao SO

1. Dois modos de identificação de tipo de processo
 - ❑ Processo de usuário
 - ❑ Processo de SO (supervisor, *kernel* ou executivo)
2. Munir o processador de um estado que permita que um processo possa ler mas não escrever
 - ❑ Bit de modo usuário/supervisor
 - ❑ Ponteiro para a tabela de páginas
 - ❑ TLB
3. Fornecer mecanismos para o processador mudar de modo
 - ❑ Chamada de sistema (inst. syscall): usuário => supervisor
 - ❑ Return from exception (inst. ERET): supervisor => usuário

Implementando proteção com memória virtual

24

- ❑ **O SO deve proteger as tabelas de páginas**
 - ❑ As tabelas de página devem ser colocadas no espaço de endereçamento protegido do SO
 - ❑ Isso impede que um processo modifique sua tabela de página para acessar o espaço de endereçamento de outro processo
- ❑ **Compartilhamento de páginas entre processos**
 - ❑ Deve ser auxiliado pelo SO

Glossário

❑ **Memória virtual**

- ❑ Uma técnica que usa a memória principal como uma “cache” para armazenamento secundário

❑ **Endereço físico**

- ❑ Um endereço na memória principal

❑ **Proteção**

- ❑ Um conjunto de mecanismos para garantir que múltiplos processos compartilhando processador, memória ou dispositivos de E/S não possam interferir, intencionalmente ou não, um com o outro, lendo ou escrevendo dados no outro. Esses mecanismos também isolam o sistema operacional de um processo de usuário

❑ **Falta de página**

- ❑ Um evento que ocorre quando uma página acessada não está presente na memória principal

Glossário

26

❑ Endereço virtual

- ❑ Um endereço que corresponde a um local no espaço no espaço virtual e é traduzido pelo mapeamento de endereço para um endereço físico quando a memória é acessada

❑ Tradução de endereço (ou mapeamento de endereço)

- ❑ O processo pelo qual um endereço virtual é mapeado para um endereço físico usado para acessar a memória

❑ Segmentação

- ❑ Esquema de mapeamento de endereço de tamanho variável em que um endereço consiste em um número de segmento (que é mapeado para um endereço físico) e um offset de segmento

Glossário

27

❑ Tabela de páginas

- ❑ A tabela com as traduções de endereço virtual para físico em um sistema de memória virtual. Armazenada na memória, normalmente é indexada pelo número da página virtual; cada entrada na tabela contém o número da página física para essa página virtual se a página estiver atualmente na memória

❑ Área de swap

- ❑ O espaço no disco reservado para o espaço de memória virtual completo de um processo

❑ Bit de referência (ou bit de uso)

- ❑ Um campo que é ligado sempre que uma página é acessada e que é usado para implementar LRU ou outros esquemas de substituição

❑ TLB (Translation Lookaside Buffer)

- ❑ Uma cache que monitora os mapeamentos de endereços recentemente usados para evitar um acesso à tabela de páginas