



UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
SERGIPE



DEPARTAMENTO
DE COMPUTAÇÃO

Memória virtual

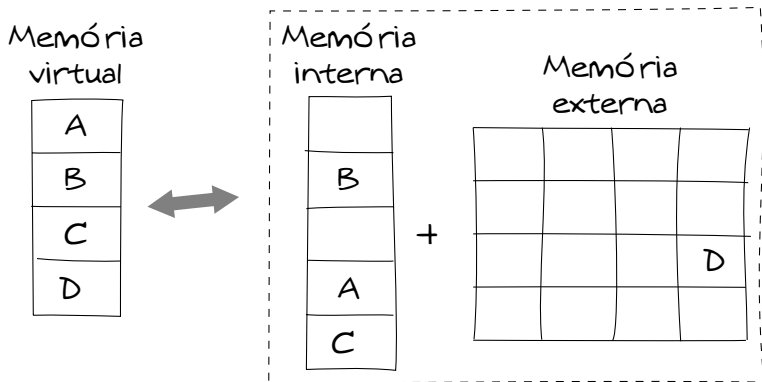
Arquitetura de Computadores

Bruno Prado

Departamento de Computação / UFS

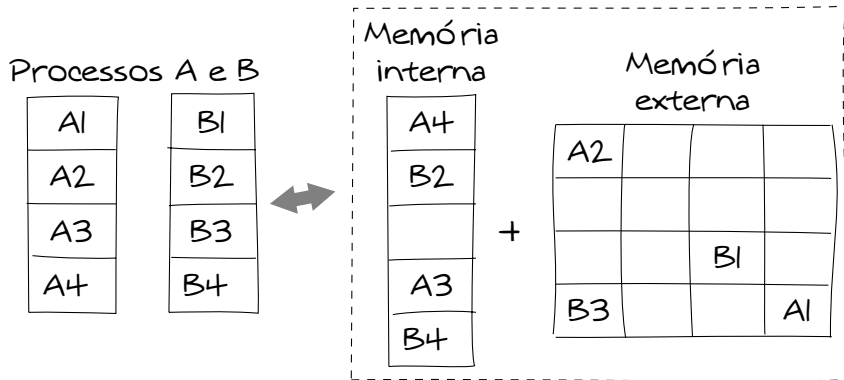
Introdução

- ▶ O que é memória virtual?
 - ▶ É uma organização lógica da memória para abstrair os endereços físicos da hierarquia de memória
 - ▶ Cada processo possui seu próprio espaço de endereçamento que é contínuo e dedicado



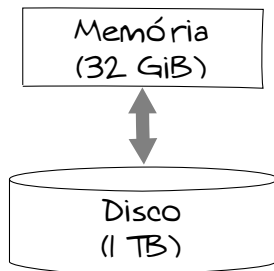
Introdução

- ▶ Como a memória virtual é implementada?
 - ▶ A memória física é dividida em blocos chamados de páginas que são alocadas para diferentes processos
 - ▶ Esta organização cria um esquema de proteção dos dados, pois cada processo tem suas próprias páginas



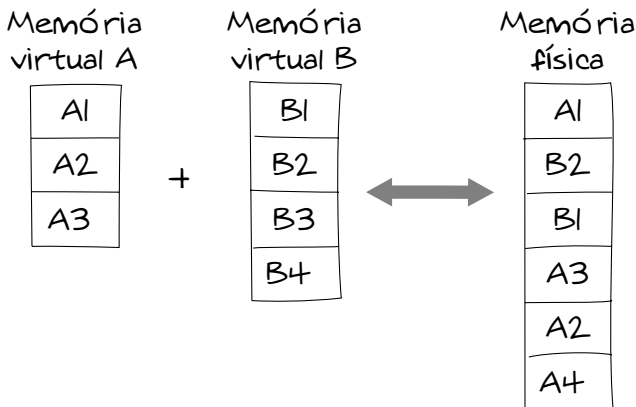
Introdução

- ▶ Por que a memória virtual foi desenvolvida?
 - ▶ Para eliminar a responsabilidade do programador de gerenciamento situações onde o software e seus dados não cabem na memória física
 - ▶ Este gerenciamento consiste em dividir o software em partes que são substituídas sob demanda na memória ao longo da execução do software



Introdução

- ▶ Por que a memória virtual foi desenvolvida?
 - ▶ Os dados da memória são contíguos e esta organização pode causar fragmentação da memória
 - ▶ Na memória virtual, o mapeamento não contíguo dos endereços evita a fragmentação externa dos dados



Introdução

- ▶ Quem vai realizar o gerenciamento de memória?

Introdução

- ▶ Quem vai realizar o gerenciamento de memória?
 - ▶ Hardware: é suportado pela *Memory Management Unit* (MMU), realizando a tradução de endereço, controle de cache e proteção de memória

Introdução

- ▶ Quem vai realizar o gerenciamento de memória?
 - ▶ Hardware: é suportado pela *Memory Management Unit* (MMU), realizando a tradução de endereço, controle de cache e proteção de memória
 - ▶ Software: o sistema operacional mantém na memória uma tabela de páginas para armazenar o endereço físico onde a página está armazenada

Introdução

- ▶ Pontos chave do projeto de memória virtual
 - ▶ Utilização de uma técnica associativa de páginas para minimizar a taxa de falta na memória

Introdução

- ▶ Pontos chave do projeto de memória virtual
 - ▶ Utilização de uma técnica associativa de páginas para minimizar a taxa de falta na memória
 - ▶ A melhoria da taxa de faltas pode ser obtida com algoritmos de substituição das páginas

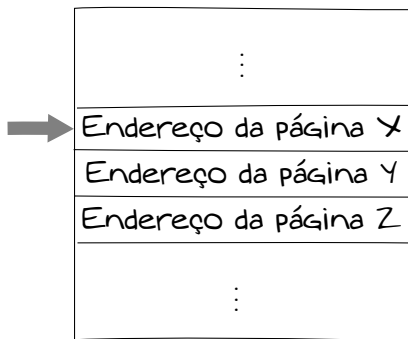
Introdução

- ▶ Pontos chave do projeto de memória virtual
 - ▶ Utilização de uma técnica associativa de páginas para minimizar a taxa de falta na memória
 - ▶ A melhoria da taxa de faltas pode ser obtida com algoritmos de substituição das páginas
 - ▶ A política de escrita na hierarquia deve ser atrasada (*write back*), uma vez que o acesso dos dispositivos de memória pode ser muito demorado

Paginação

- ▶ Estrutura da tabela de páginas
 - ▶ Endereços virtuais de 32 bits e páginas com 4 KiB
 - ▶ Com $2^{32} \div 2^{12} = 2^{20}$ páginas, a tabela de páginas possui até $2^{20} \times 4 = 4 \text{ MiB}$ para cada processo

Tabela de páginas



⋮
Endereço da página X
Endereço da página Y
Endereço da página Z
⋮

Paginação

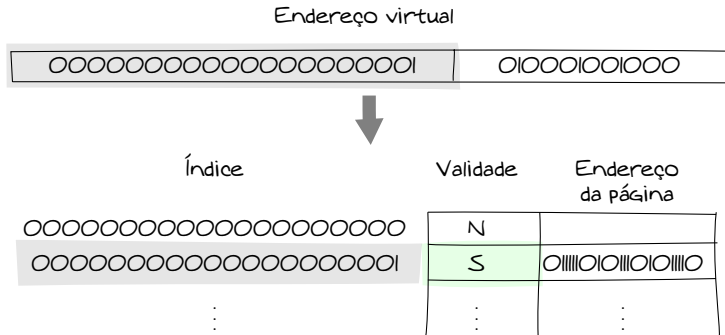
- ▶ Estrutura da tabela de páginas
 - ▶ Necessidade de campo de validade para indicar se página está disponível na memória principal

Endereço virtual

00000000000000000000000001	010001001000
----------------------------	--------------

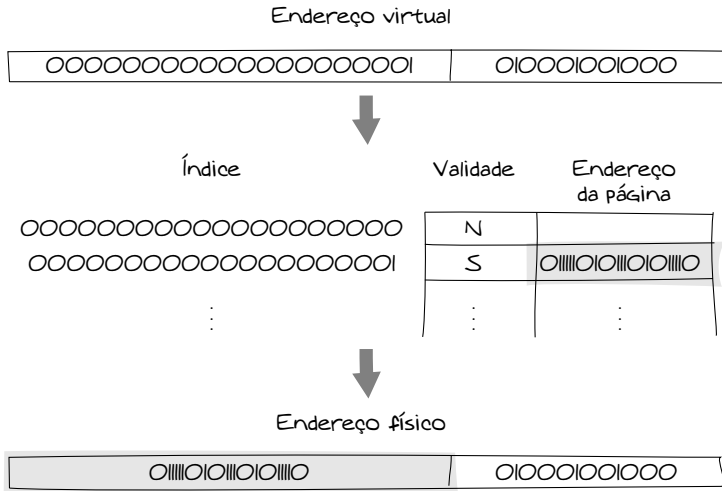
Paginação

- ▶ Estrutura da tabela de páginas
 - ▶ Necessidade de campo de validade para indicar se página está disponível na memória principal



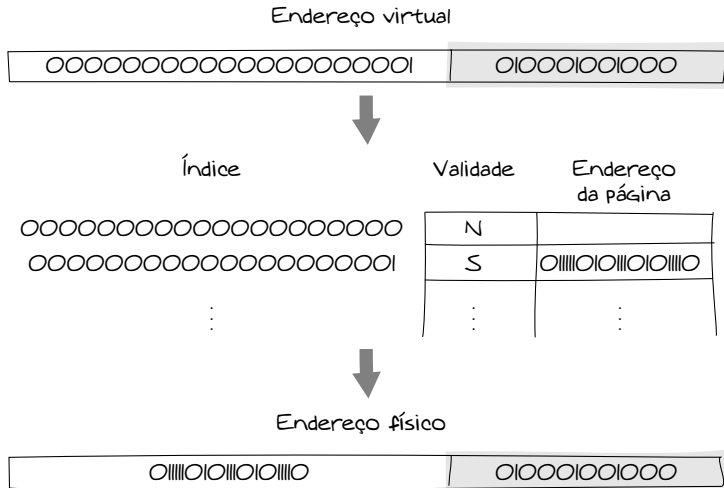
Paginação

- ▶ Estrutura da tabela de páginas
 - ▶ Necessidade de campo de validade para indicar de página está disponível na memória principal



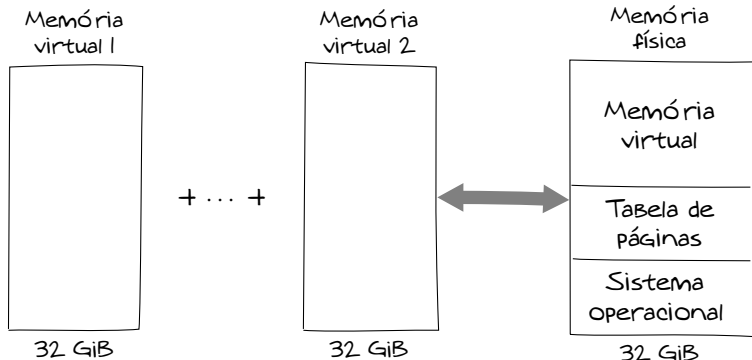
Paginação

- ▶ Estrutura da tabela de páginas
 - ▶ Necessidade de campo de validade para indicar se página está disponível na memória principal



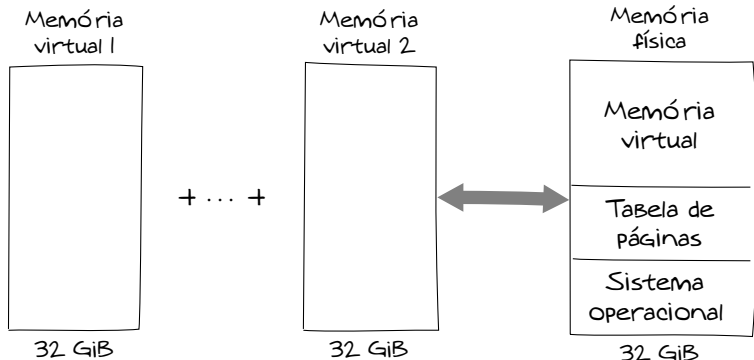
Paginação

- ▶ Estrutura da tabela de páginas
 - ▶ Visão geral da organização da memória



Paginação

- ▶ Estrutura da tabela de páginas
 - ▶ Visão geral da organização da memória



O que acontece se todos os N processos utilizarem a capacidade total de suas memórias?

- ▶ Gerenciamento de memória
 - ▶ Todos os componentes da hierarquia de memória apresentam limitações quanto a capacidade
 - ▶ Registradores < Cache < Memória < Disco

- ▶ Gerenciamento de memória
 - ▶ Todos os componentes da hierarquia de memória apresentam limitações quanto a capacidade
 - ▶ Registradores < Cache < Memória < Disco
 - ▶ Quando uma página solicitada não possui um endereço físico, ou seja, não está na memória principal, ocorre uma falta de página
 - ▶ É decorrente da limitação de capacidade de armazenamento da memória física
 - ▶ Se a capacidade é excedida e esta informação foi modificada, é necessário realizar a transferência para o nível inferior da hierarquia (*write back*)

Paginação

- ▶ Gerenciamento de memória
 - ▶ Todos os componentes da hierarquia de memória apresentam limitações quanto a capacidade
 - ▶ Registradores < Cache < Memória < Disco
 - ▶ Quando uma página solicitada não possui um endereço físico, ou seja, não está na memória principal, ocorre uma falta de página
 - ▶ É decorrente da limitação de capacidade de armazenamento da memória física
 - ▶ Se a capacidade é excedida e esta informação foi modificada, é necessário realizar a transferência para o nível inferior da hierarquia (*write back*)

$\uparrow \%Faltas \longleftrightarrow \downarrow Desempenho$

Paginação

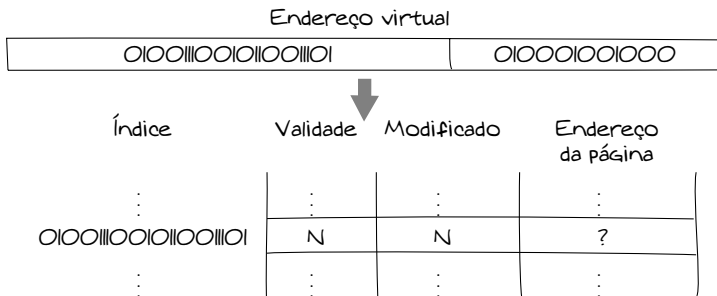
- ▶ Falta de página
 - ▶ A página solicitada não está disponível na memória
 - ▶ É preciso acessar a memória externa (*swap space*)

Endereço virtual



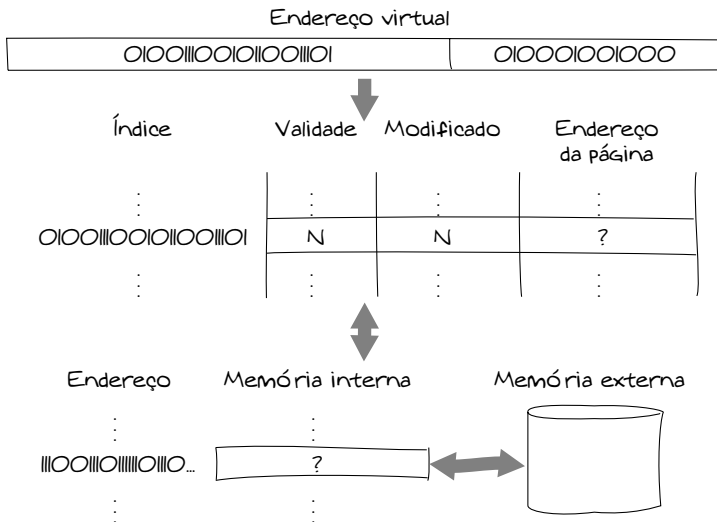
Paginação

- ▶ Falta de página
 - ▶ A página solicitada não está disponível na memória
 - ▶ É preciso acessar a memória externa (*swap space*)



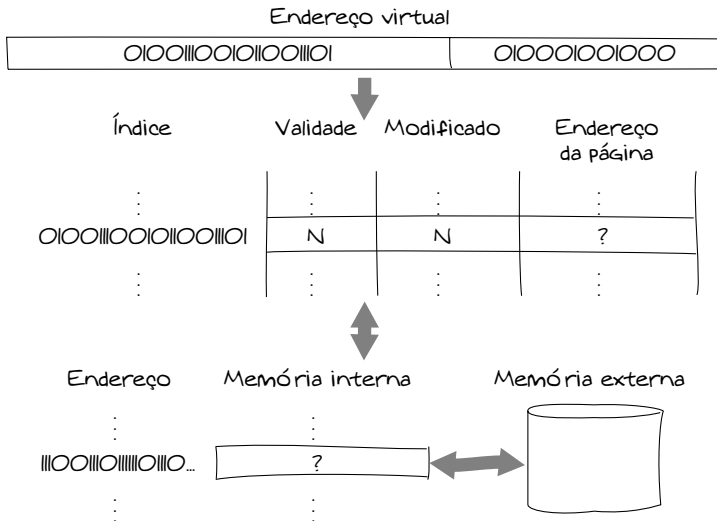
Paginação

- ▶ Falta de página
 - ▶ A página solicitada não está disponível na memória
 - ▶ É preciso acessar a memória externa (*swap space*)



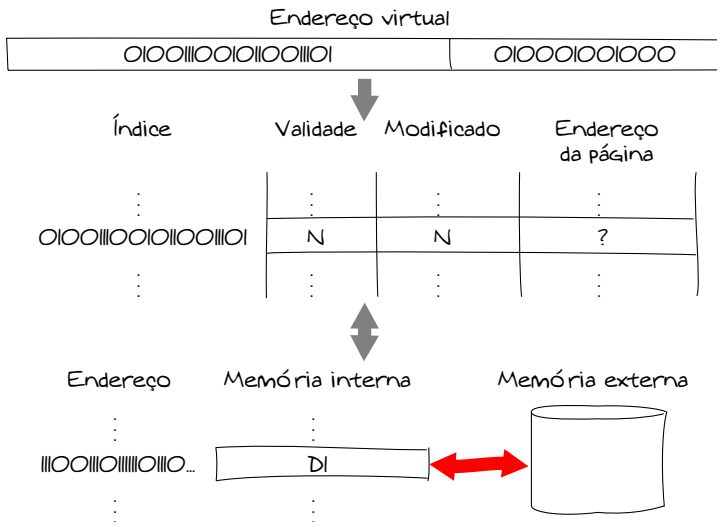
Paginação

- ▶ Falta de página
 - ▶ O endereço físico da memória recebe o dado
 - ▶ A página solicitada foi escrita na tabela



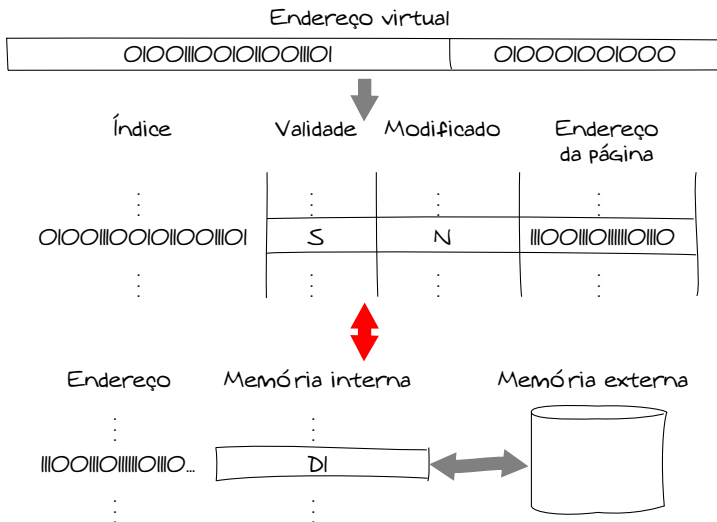
Paginação

- ▶ Falta de página
 - ▶ O endereço físico da memória recebe o dado
 - ▶ A página solicitada foi escrita na tabela



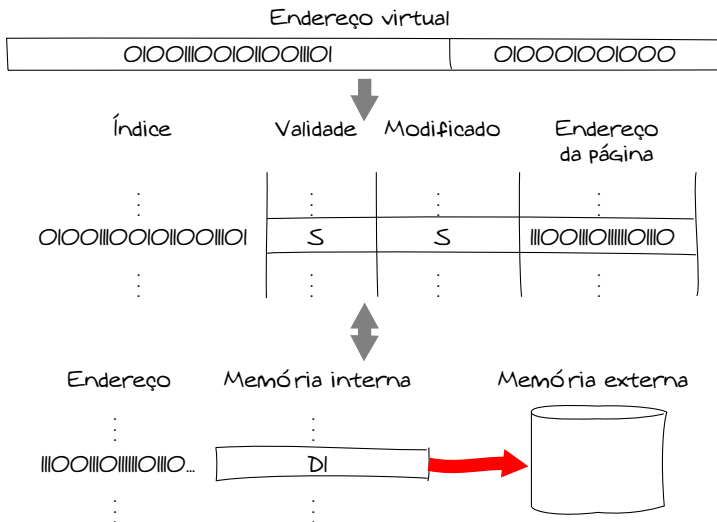
Paginação

- ▶ Falta de página
 - ▶ O endereço físico da memória recebe o dado
 - ▶ A página solicitada foi escrita na tabela



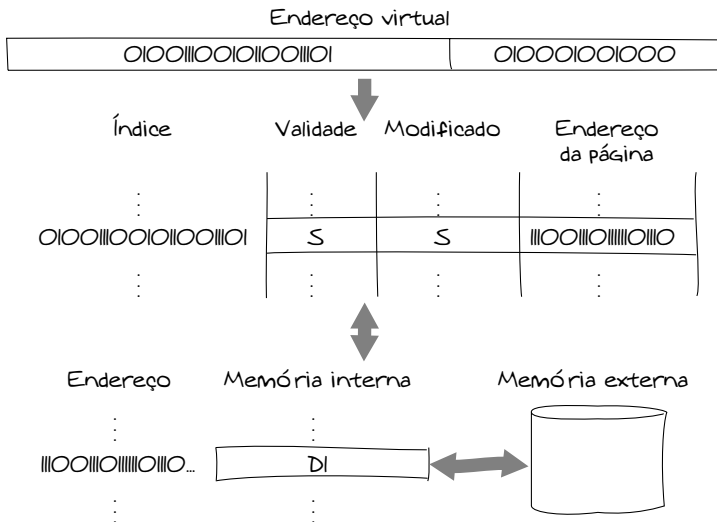
Paginação

- ▶ Falta de página
 - ▶ Não existem mais posições disponíveis na tabela
 - ▶ A página foi modificada e será substituída



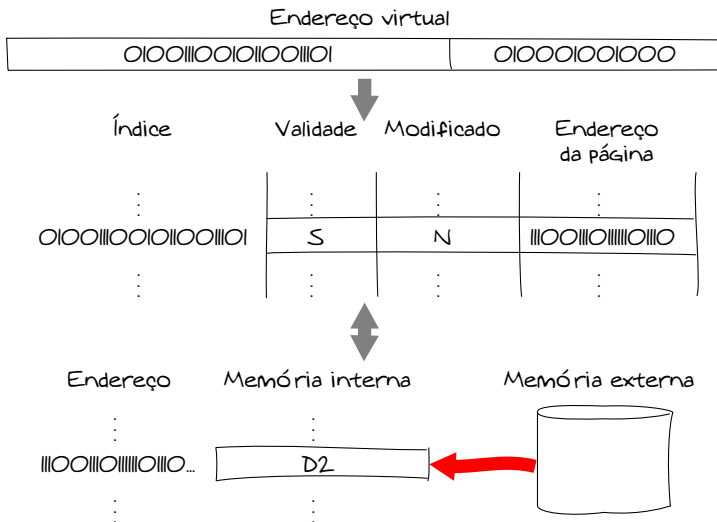
Paginação

- ▶ Falta de página
 - ▶ Não existem mais posições disponíveis na tabela
 - ▶ A página foi modificada e será substituída



Paginação

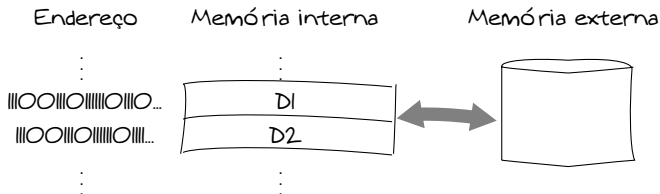
- ▶ Falta de página
 - ▶ Não existem mais posições disponíveis na tabela
 - ▶ A página foi modificada e será substituída



Paginação

- ▶ Falta de página
 - ▶ Política de substituição LRU
 - ▶ Campo de idade associado a cada página

Índice	Validade	Modificado	Idade	Endereço da página
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0100111001011001101	S	N	0	1100111011101110
010101001101010010	S	N	3	1100111011101111
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮



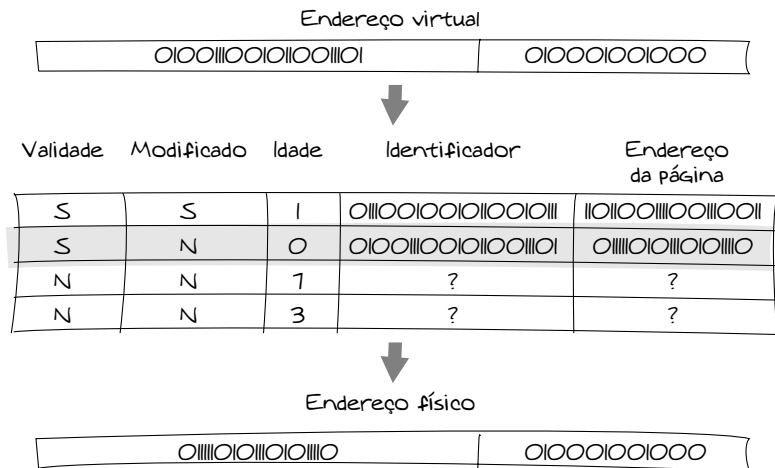
- ▶ O que acontece quando os processos utilizam muito mais memória do que está disponível?
 - ▶ As faltas de páginas são constantes e recorrentes para cada processo, mesmo com políticas sofisticadas de substituição de páginas
 - ▶ O sistema consome maior parte do tempo realizando acesso e troca de páginas (*trashing*)

- ▶ O que acontece quando os processos utilizam muito mais memória do que está disponível?
 - ▶ As faltas de páginas são constantes e recorrentes para cada processo, mesmo com políticas sofisticadas de substituição de páginas
 - ▶ O sistema consome maior parte do tempo realizando acesso e troca de páginas (*trashing*)

Como melhorar o desempenho no acesso da tabela de páginas armazenadas na memória?

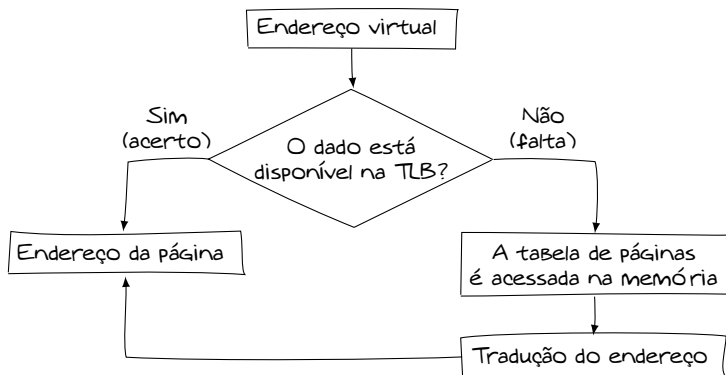
Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cache para tradução de endereços com mapeamento das linhas totalmente associativo
 - ▶ Evita que a memória seja acessada diretamente para obtenção dos endereços físicos da tabela de páginas



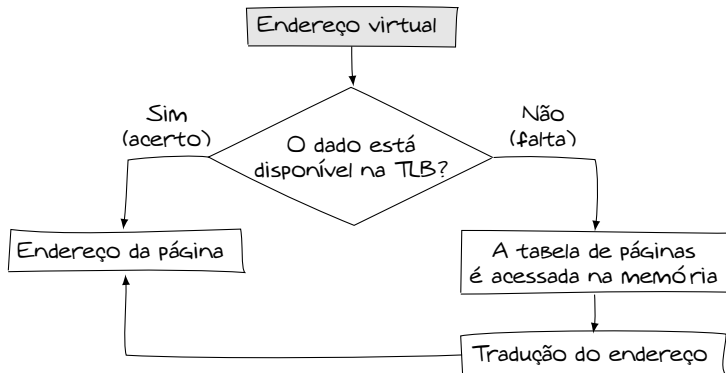
Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual e de acesso da tabela de páginas na memória principal



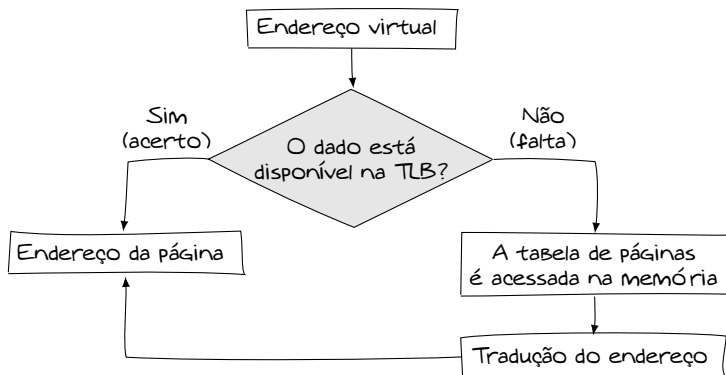
Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual e de acesso da tabela de páginas na memória principal



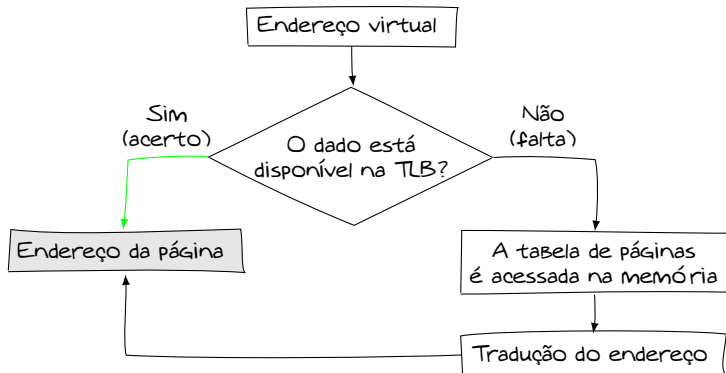
Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual e de acesso da tabela de páginas na memória principal



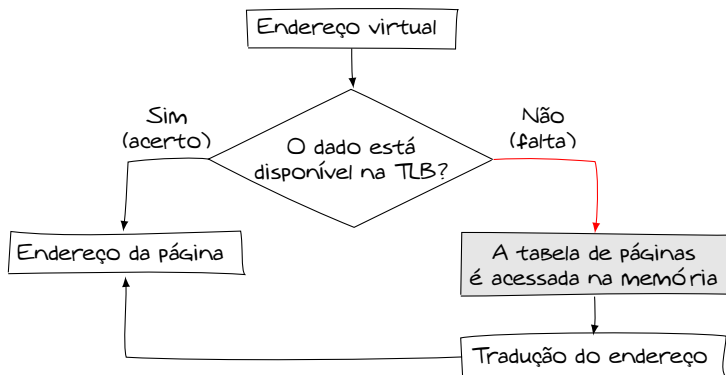
Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual e de acesso da tabela de páginas na memória principal



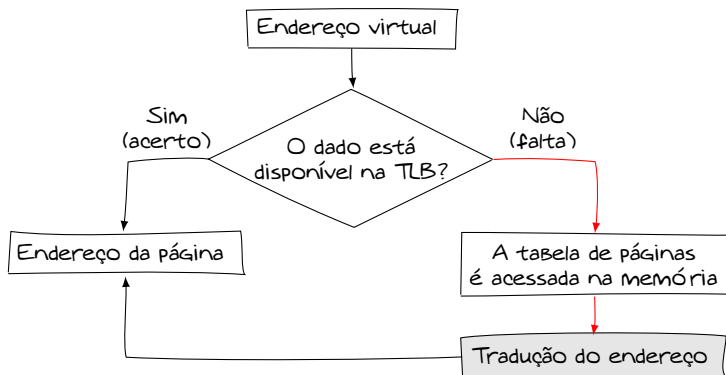
Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual e de acesso da tabela de páginas na memória principal



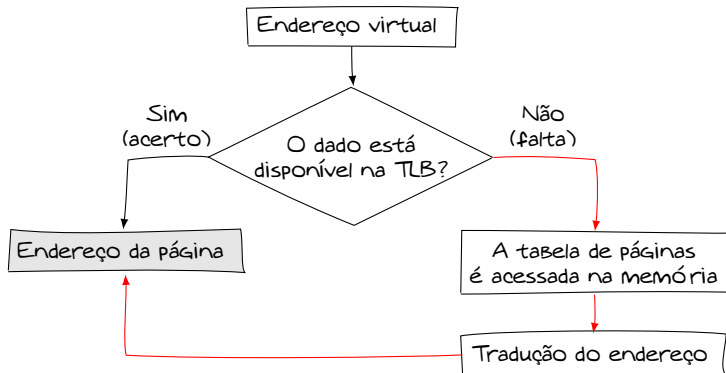
Paginação

- *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - Fluxo de tradução de endereço virtual e de acesso da tabela de páginas na memória principal



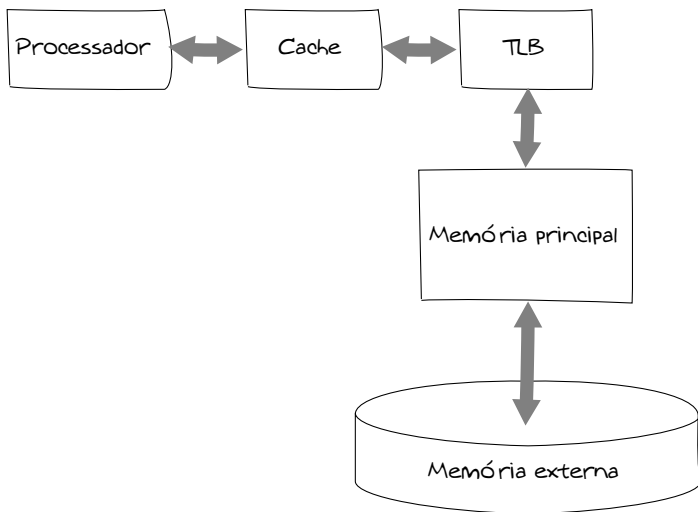
Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual e de acesso da tabela de páginas na memória principal



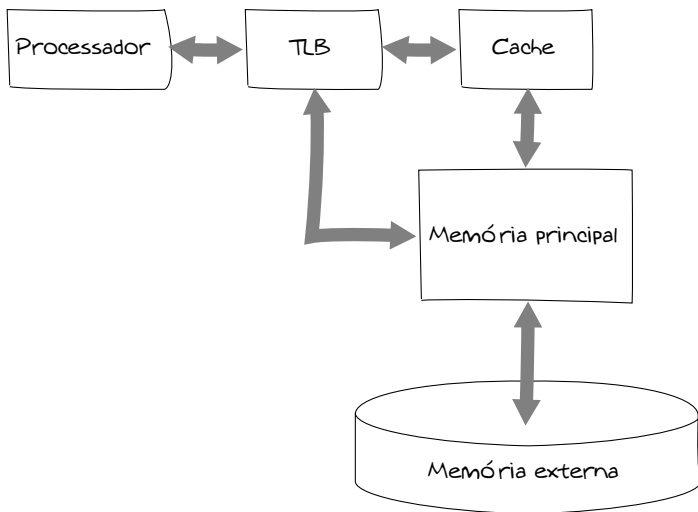
Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cache com endereçamento virtual



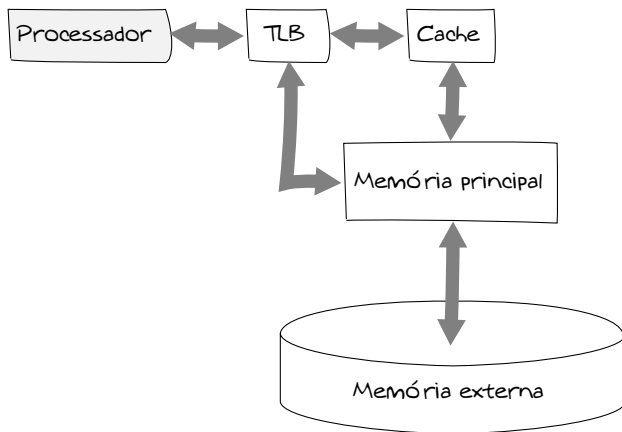
Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cache com endereçamento físico



Paginação

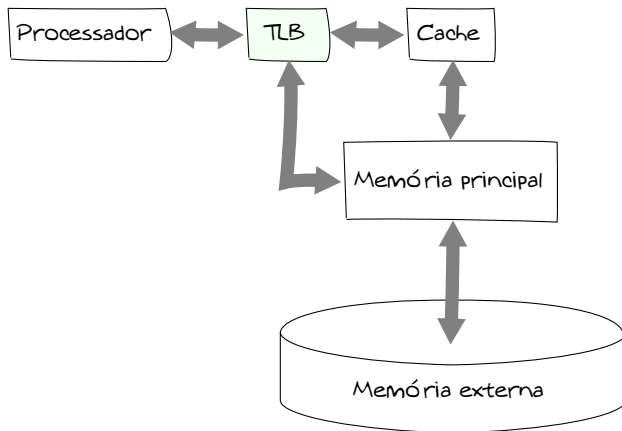
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



O processador acessa um endereço virtual

Paginação

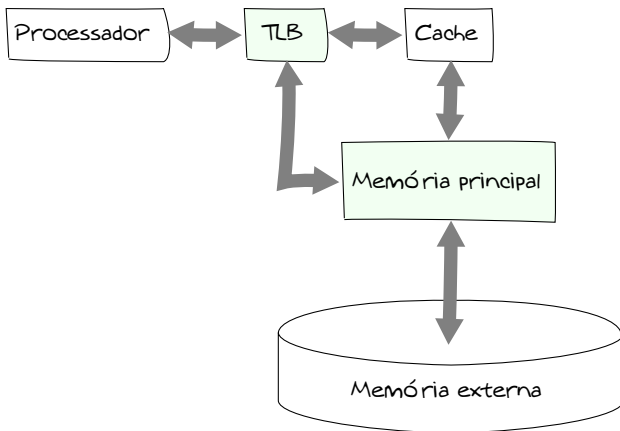
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A tradução do endereço virtual está na TLB (acerto)

Paginação

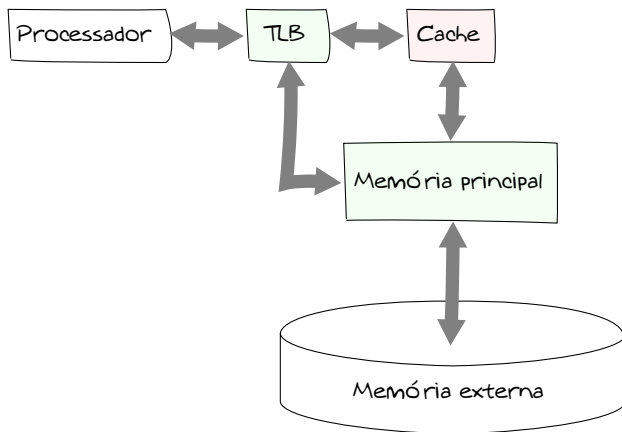
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A página solicitada está na memória principal (acerto)

Paginação

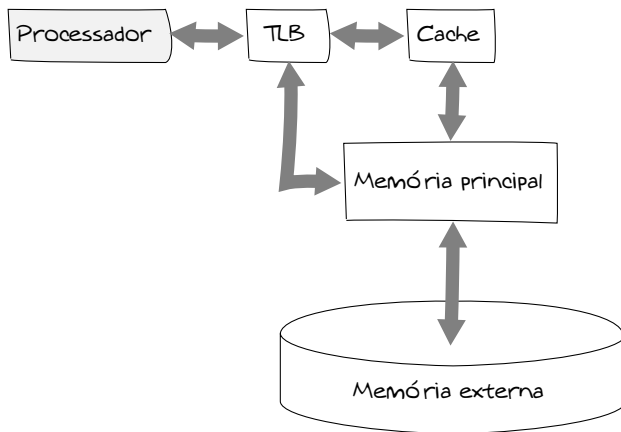
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A cache não possui o bloco do endereço físico (falta)

Paginação

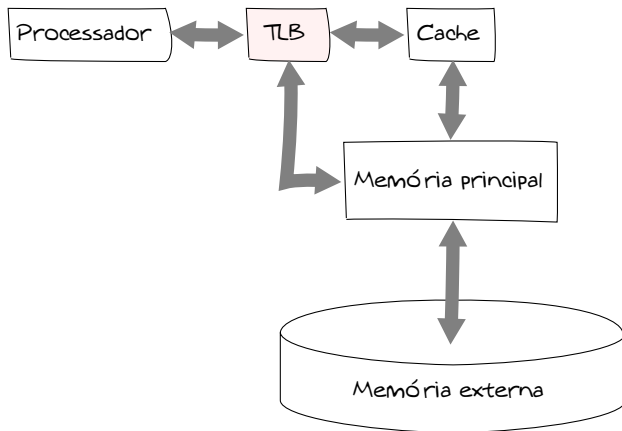
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



O processador acessa um endereço virtual

Paginação

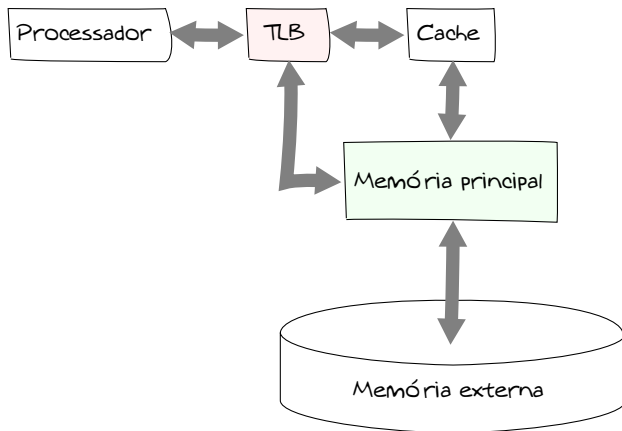
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



O endereço virtual não está na TLB (falta)

Paginação

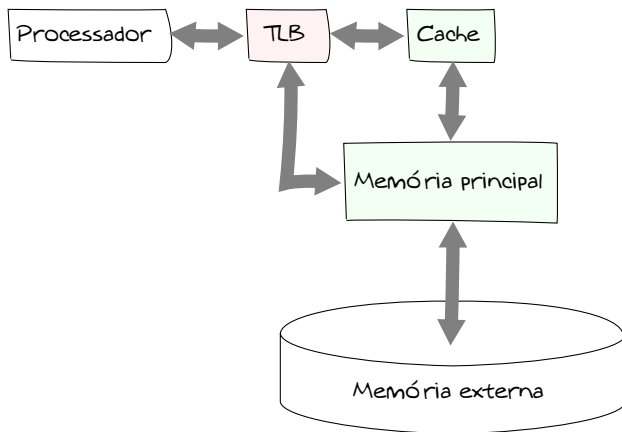
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A página solicitada está na memória principal (acerto)

Paginação

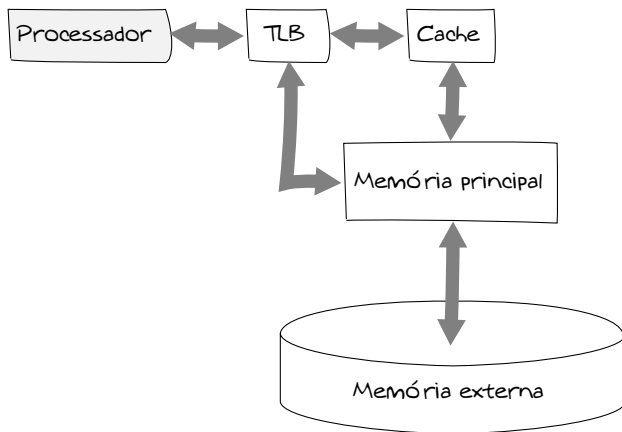
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A cache possui o bloco do endereço físico (acerto)

Paginação

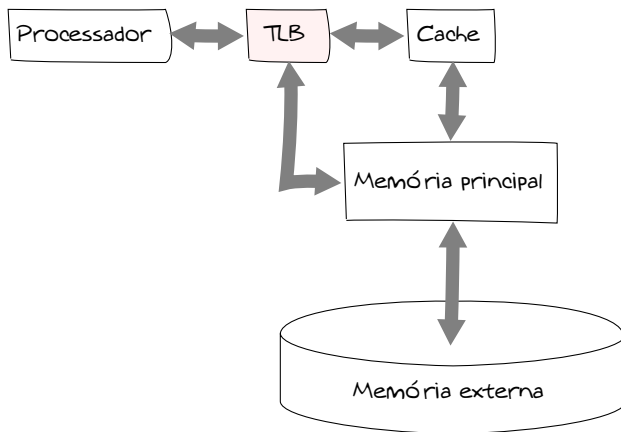
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



O processador acessa um endereço virtual

Paginação

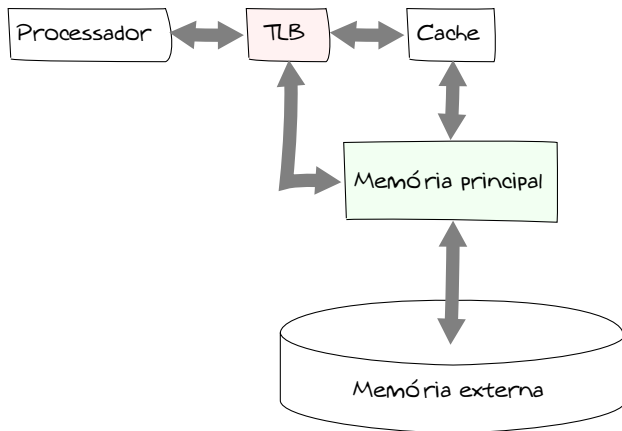
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



O endereço virtual não está na TLB (falta)

Paginação

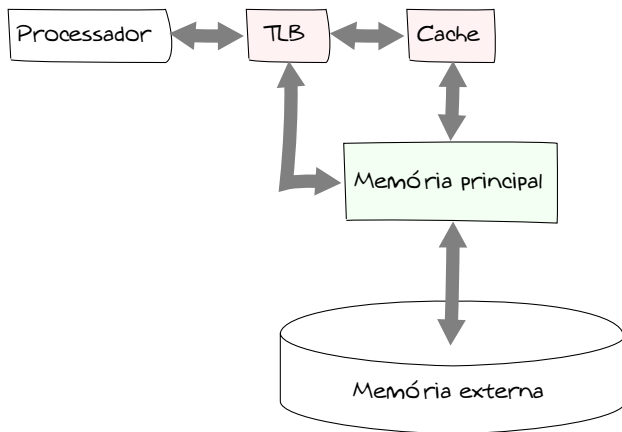
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A página solicitada está na memória principal (acerto)

Paginação

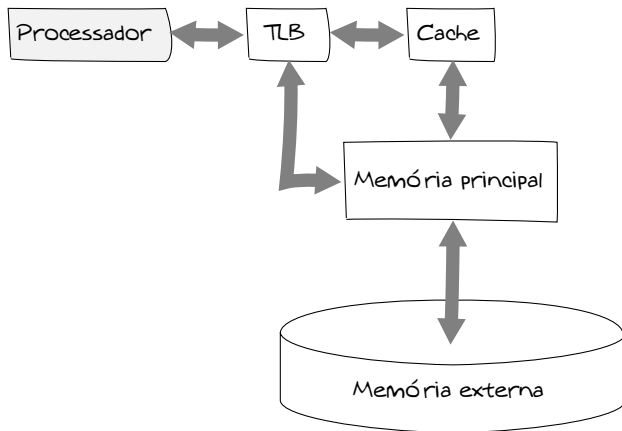
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A cache não possui o bloco do endereço físico (falta)

Paginação

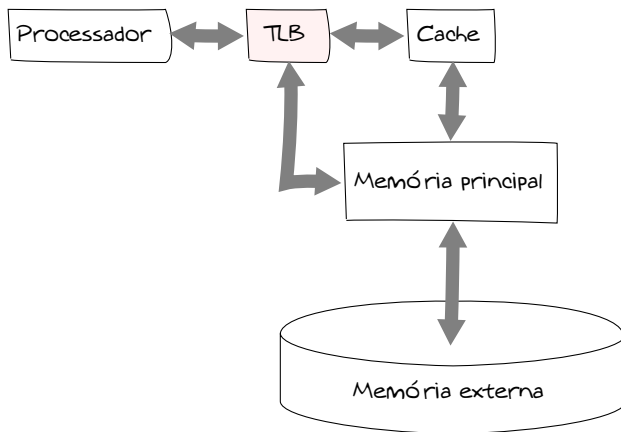
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



O processador acessa um endereço virtual

Paginação

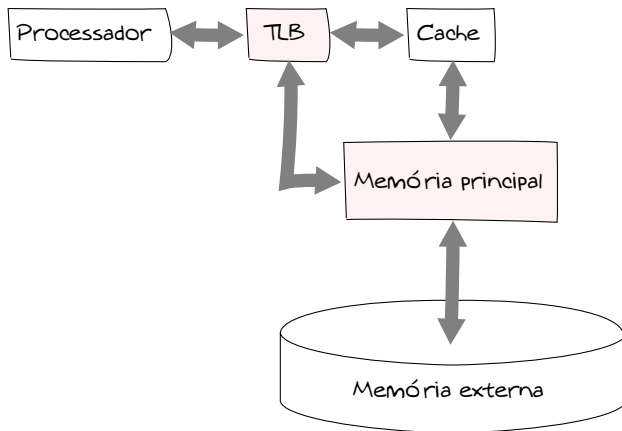
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



O endereço virtual não está na TLB (falta)

Paginação

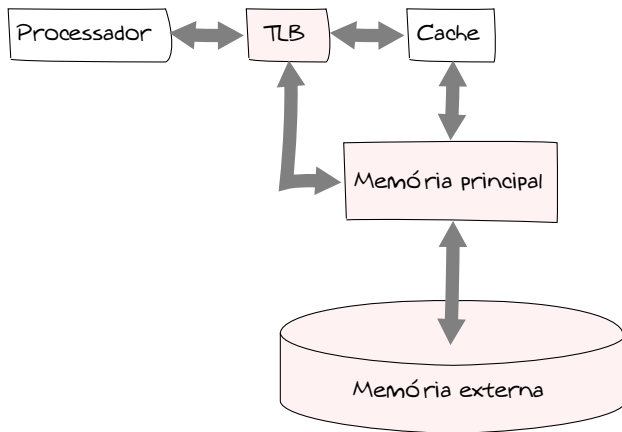
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A página solicitada não está na memória principal (falta)

Paginação

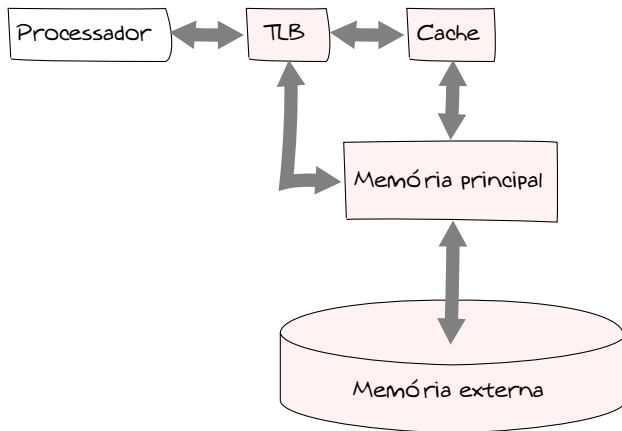
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer* (TLB)
- ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



É necessário acessar a memória externa

Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A cache não possui o bloco do endereço físico (falta)

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
 - ▶ Resumo dos cenários de tradução de endereços virtuais e acesso às páginas na memória principal

TLB	Página	Cache	Descrição
Acerto	Acerto	Falta	A tradução para endereço físico está na TLB, mas a o dado não está disponível na cache
Falta	Acerto	Acerto	A TLB gera uma falta, causando o acesso para tabela de páginas para endereçar a cache
Falta	Acerto	Falta	Com a falta na TLB, é necessário acessar a tabela de páginas que gera falta na cache
Falta	Falta	Falta	É o pior caso onde todos os níveis apresentam faltas, causando acesso até a memória externa

Paginação

- ▶ Por que a organização de memória virtual em páginas cria uma proteção de memória?

Paginação

- ▶ Por que a organização de memória virtual em páginas cria uma proteção de memória?
 - ▶ Previne que acessos intencionais ou causados por falhas modifiquem indevidamente o conteúdo da memória principal alocada para outros processos

- ▶ Por que a organização de memória virtual em páginas cria uma proteção de memória?
 - ▶ Previne que acessos intencionais ou causados por falhas modifiquem indevidamente o conteúdo da memória principal alocada para outros processos
 - ▶ É essencial em sistemas com múltiplos processos (multitarefa) que compartilham a mesma memória
 - ▶ O sistema operacional é responsável pelo controle de acesso das páginas utilizadas pelos processos
 - ▶ Proteção de escrita da tabela de páginas, através de modos de operação (supervisor e usuário)
 - ▶ Chaveamento de modos de operação através de chamadas de sistema para tratamento de faltas

Segmentação

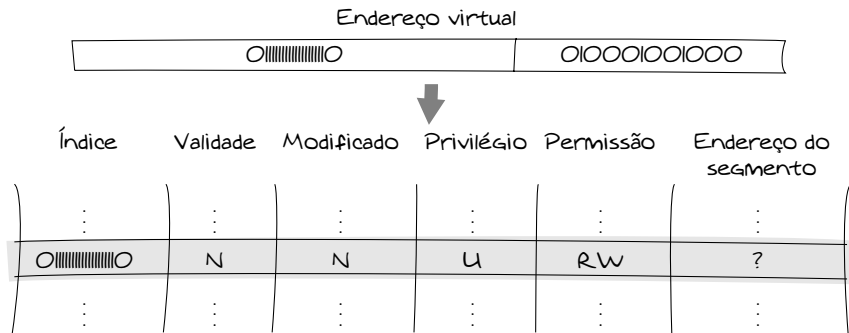
- ▶ O que é segmentação de memória?
 - ▶ Cria uma organização dos endereços da memória em segmentos que permite a definição de categorias e de atributos de privilégio e de proteção de acesso

Segmentação

- ▶ O que é segmentação de memória?
 - ▶ Cria uma organização dos endereços da memória em segmentos que permite a definição de categorias e de atributos de privilégio e de proteção de acesso
 - ▶ Ao contrário da paginação, o esquema de segmentação é configurável e visível ao programador

Segmentação

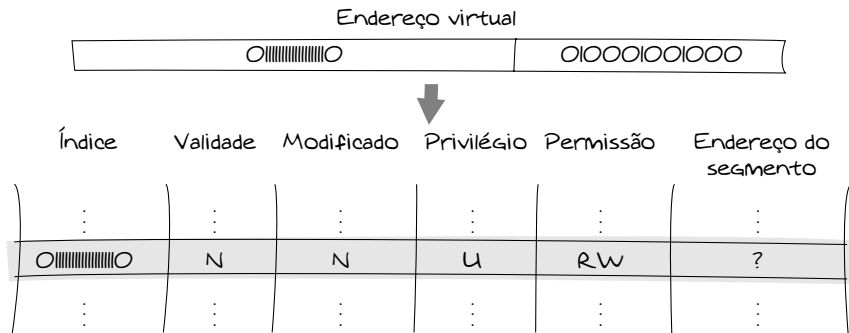
- ▶ Segmentos de memória
 - ▶ Ao contrário das páginas que possuem tamanho fixo, os segmentos possuem tamanho variável que podem ser definidos pelo compilador ou programador, com suas respectivas permissões de acesso



Segmentação

- ▶ Segmentos de memória

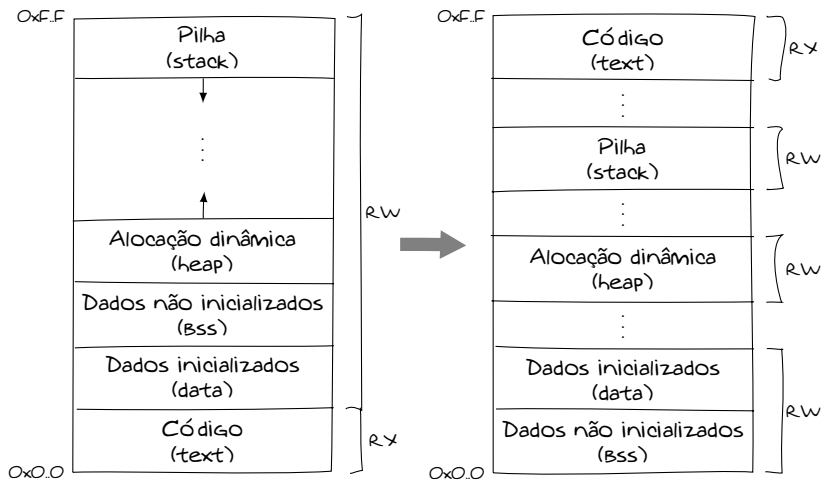
- ▶ Ao contrário das páginas que possuem tamanho fixo, os segmentos possuem tamanho variável que podem ser definidos pelo compilador ou programador, com suas respectivas permissões de acesso



O endereço virtual faz referência a uma tabela de segmentos para a tradução do endereço do segmento

Segmentação

► Memória virtual x Memória física



Segmentação

- ▶ Falha de segmentação (*segmentation fault*)
 - ▶ É gerada quando endereços inválidos são acessados
 - ▶ Endereço inexistente
 - ▶ Acesso não alinhado

Segmentação

- ▶ Falha de segmentação (*segmentation fault*)
 - ▶ É gerada quando endereços inválidos são acessados
 - ▶ Endereço inexistente
 - ▶ Acesso não alinhado
 - ▶ Violação de restrição ou privilégio
 - ▶ Tentativa de escrita de segmento somente leitura
 - ▶ Acesso de usuário em segmento de supervisor

Segmentação

► Comparativo entre paginação e segmentação

Característica	Paginação	Segmentação
Estruturas de dados dinâmicas	×	✓
Compartilhamento de dados entre processos	×	✓
Proteção por atributos de controle	×	✓
Gerenciamento invisível ao programador	✓	×
Fragmentação externa de memória	✓	×

Segmentação

► Comparativo entre paginação e segmentação

Característica	Paginação	Segmentação
Estruturas de dados dinâmicas	✗	✓
Compartilhamento de dados entre processos	✗	✓
Proteção por atributos de controle	✗	✓
Gerenciamento invisível ao programador	✓	✗
Fragmentação externa de memória	✓	✗

É possível combinar as características da paginação e da segmentação em um mesmo sistema?

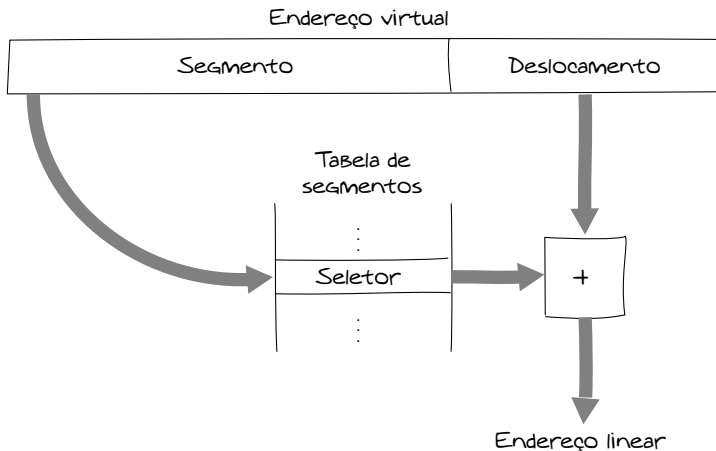
Segmentação paginada

- ▶ Endereço virtual
 - ▶ Indexação do segmento para obtenção do endereço linear que será usado na paginação



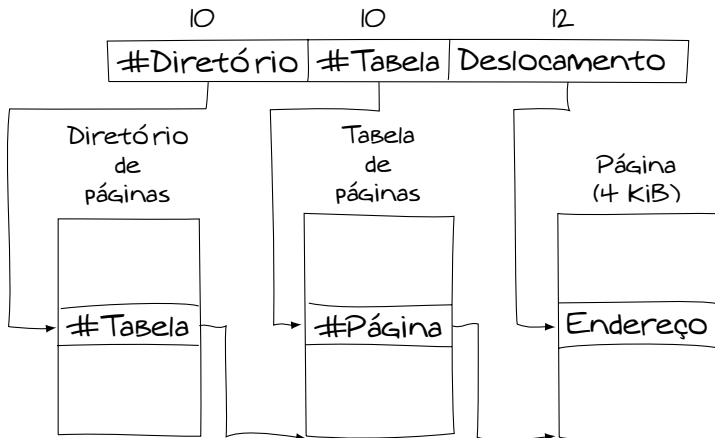
Segmentação paginada

- ▶ Endereço virtual
 - ▶ Indexação do segmento para obtenção do endereço linear que será usado na paginação



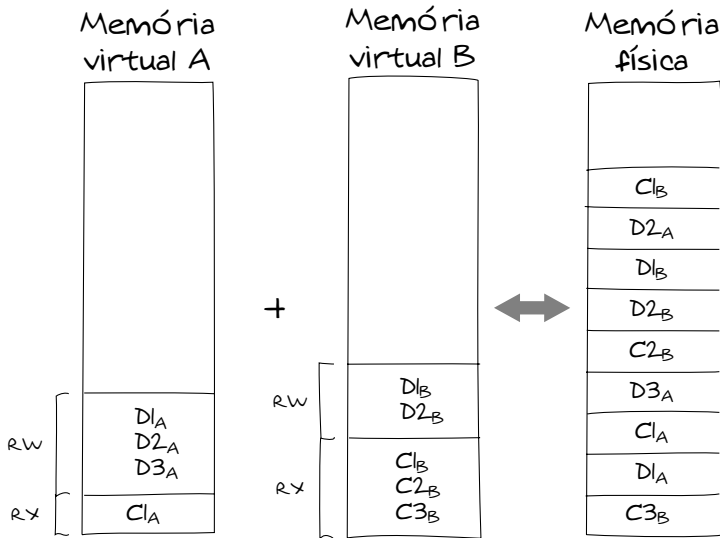
Segmentação paginada

- Endereço linear
 - Indexação do diretório e da tabela de páginas para tradução para o endereço físico



Segmentação paginada

► Memória virtual x Memória física



Segmentação paginada

- ▶ Segmentação paginada
 - ▶ A tabela de segmentos indexa uma posição do diretório de páginas que referencia a tabela de páginas correspondente ao segmento

Segmentação paginada

- ▶ Segmentação paginada
 - ▶ A tabela de segmentos indexa uma posição do diretório de páginas que referencia a tabela de páginas correspondente ao segmento
 - ▶ Todo o espaço de endereçamento pode ser utilizado por cada segmento definido no software

Segmentação paginada

- ▶ Segmentação paginada
 - ▶ A tabela de segmentos indexa uma posição do diretório de páginas que referencia a tabela de páginas correspondente ao segmento
 - ▶ Todo o espaço de endereçamento pode ser utilizado por cada segmento definido no software
 - ▶ Combina as características de ambas organizações, sendo utilizada nas principais arquiteturas
 - ▶ Multics
 - ▶ Intel x86
 - ▶ ARM
 - ▶ ...

Sistemas embarcados

- ▶ O que é um sistema embarcado?
 - ▶ É um sistema computacional para desempenhar funções de controle especializadas, geralmente com restrições de funcionamento em tempo real

Sistemas embarcados

- ▶ O que é um sistema embarcado?
 - ▶ É um sistema computacional para desempenhar funções de controle especializadas, geralmente com restrições de funcionamento em tempo real
- Por que não utilizar memória virtual?

Sistemas embarcados

- ▶ O que é um sistema embarcado?
 - ▶ É um sistema computacional para desempenhar funções de controle especializadas, geralmente com restrições de funcionamento em tempo real

Por que não utilizar memória virtual?

- ▶ Tempo determinístico para execução do software: a falta de páginas não é previsível (não determinismo)

Sistemas embarcados

- ▶ O que é um sistema embarcado?
 - ▶ É um sistema computacional para desempenhar funções de controle especializadas, geralmente com restrições de funcionamento em tempo real

Por que não utilizar memória virtual?

- ▶ Tempo determinístico para execução do software: a falta de páginas não é previsível (não determinismo)
- ▶ Limitações no hardware: falta de unidade de gerenciamento de memória (MMU) e grande latência no acesso da memória externa