



UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE  
SERGIPE



DEPARTAMENTO  
DE COMPUTAÇÃO

# Memória virtual

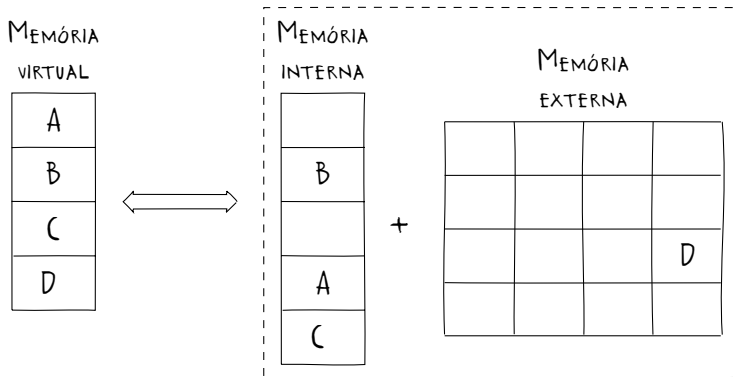
## Arquitetura de Computadores

Bruno Prado

Departamento de Computação / UFS

# Introdução

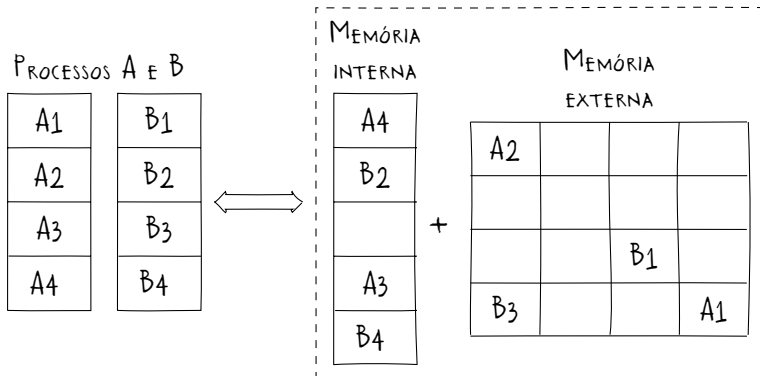
- ▶ O que é memória virtual?
  - ▶ É uma organização lógica da memória para abstrair os endereços físicos da hierarquia de memória



- ▶ Cada processo possui seu próprio espaço de endereçamento que é contínuo e dedicado

# Introdução

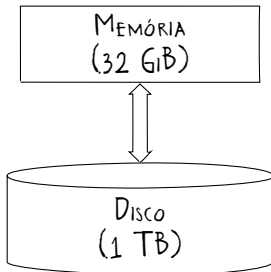
- ▶ Como a memória virtual é implementada?
  - ▶ A memória física é dividida em blocos chamados de páginas que são alocadas para diferentes processos



- ▶ Esta organização cria um esquema de proteção dos dados, pois cada processo tem suas próprias páginas

# Introdução

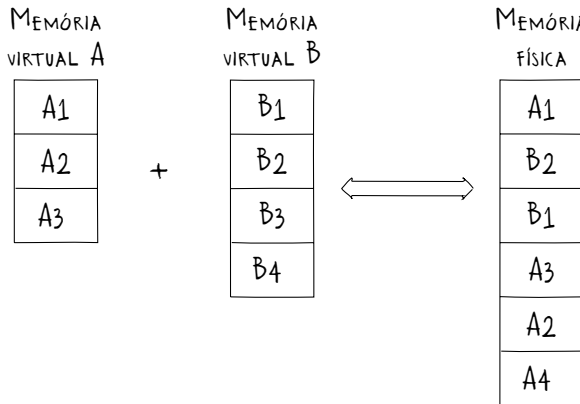
- ▶ Por que a memória virtual foi desenvolvida?
  - ▶ Além da proteção dos dados, elimina a responsabilidade do programador pelo gerenciamento situações onde a aplicação não cabe na memória física



- ▶ Este gerenciamento consiste em dividir o código e as instruções em partes que são substituídas sob demanda na memória ao longo da execução do software

# Introdução

- ▶ Por que a memória virtual foi desenvolvida?
  - ▶ O conteúdo da aplicação são contínuos na memória e esta organização pode causar fragmentação da memória



- ▶ Na memória virtual, o mapeamento não contíguo dos endereços na memória física previne este problema

# Introdução

- ▶ Quem vai realizar o gerenciamento de memória?

# Introdução

- ▶ Quem vai realizar o gerenciamento de memória?
  - ▶ Hardware: é suportado pela *Memory Management Unit* (MMU) que é responsável pela tradução dos endereços, controle da cache e proteção de memória

# Introdução

- ▶ Quem vai realizar o gerenciamento de memória?
  - ▶ Hardware: é suportado pela *Memory Management Unit* (MMU) que é responsável pela tradução dos endereços, controle da cache e proteção de memória
  - ▶ Software: o sistema operacional mantém na memória uma tabela de páginas, com os endereços físicos de cada página que está armazenada na memória física



# Introdução

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

# Introdução

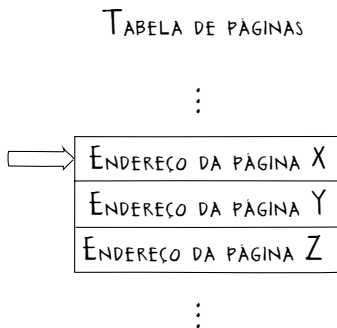
- ▶ Pontos chave do projeto de memória virtual
  - ▶ Utilização de uma técnica associativa de páginas para minimizar a taxa de falta na memória
  - ▶ A melhoria da taxa de faltas pode ser obtida com algoritmos de substituição das páginas

# 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

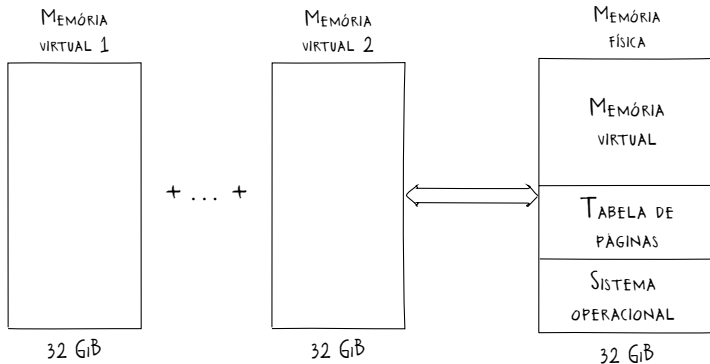
- ▶ Estrutura da tabela de páginas
  - ▶ Endereços virtuais de 32 bits e páginas com 4 KiB



- ▶ 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

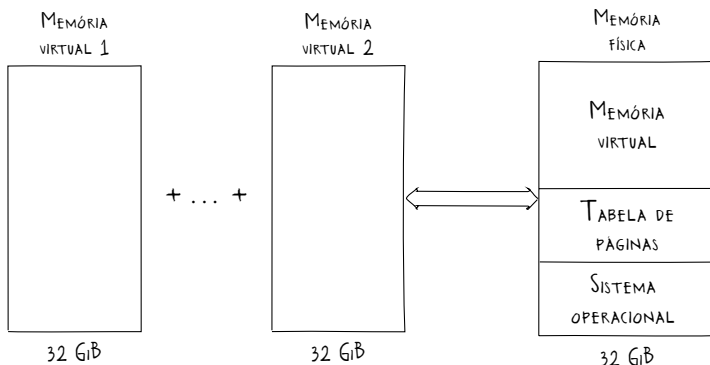
# Paginação

- ▶ 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?

## Paginação

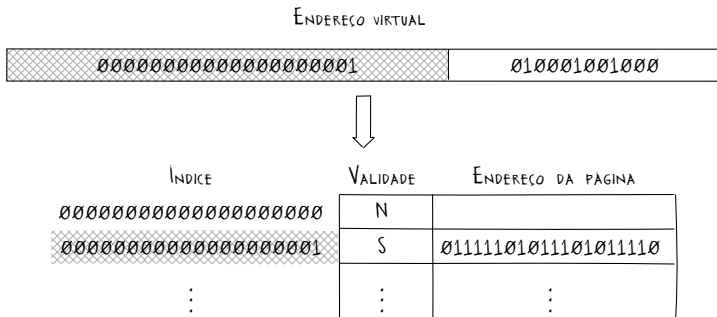
- ▶ Estrutura da tabela de páginas
  - ▶ Necessidade de campo de validade para indicar se a página solicitada está armazenada na memória física

ENDERECO VIRTUAL

0000000000000000000001	010001001000
------------------------	--------------

# Paginação

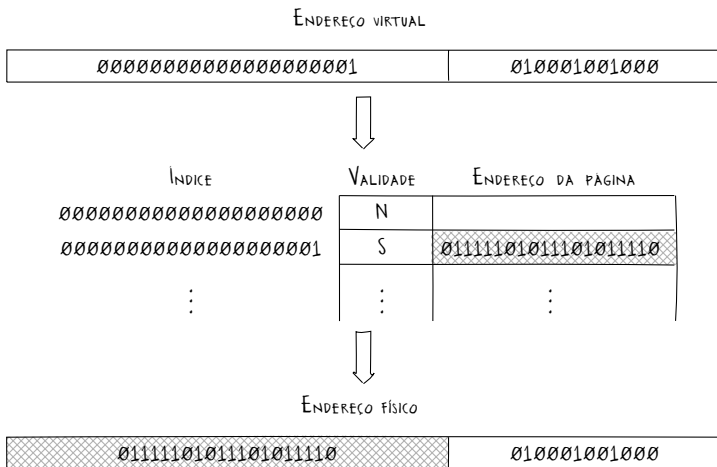
- ▶ Estrutura da tabela de páginas
  - ▶ Necessidade de campo de validade para indicar se a página solicitada está armazenada na memória física





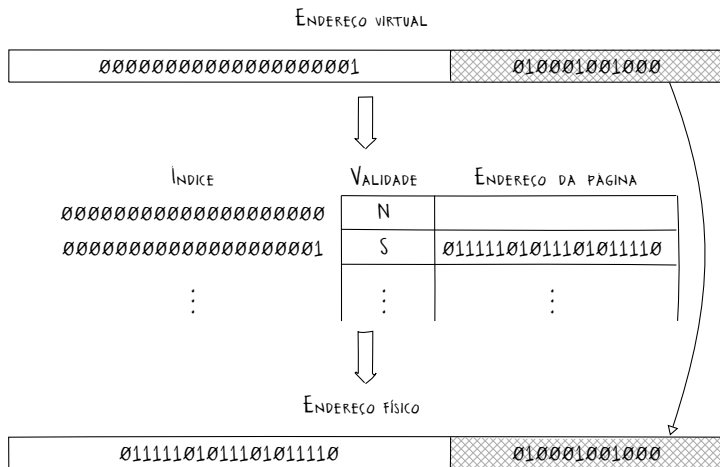
# Paginação

- ▶ Estrutura da tabela de páginas
  - ▶ Necessidade de campo de validade para indicar se a página solicitada está armazenada na memória física



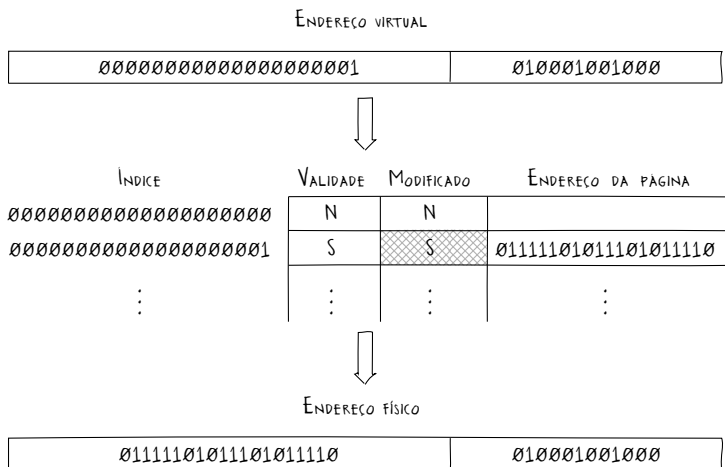
# Paginação

- ▶ Estrutura da tabela de páginas
  - ▶ Necessidade de campo de validade para indicar se a página solicitada está armazenada na memória física



# Paginação

- ▶ Estrutura da tabela de páginas
  - ▶ Se o conteúdo da página foi modificado, os dados precisam ser salvos antes da substituição (*write back*)



# Paginação

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

# 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 está na memória principal, ocorre uma falta de página (*page fault*)
    - ▶ 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*)

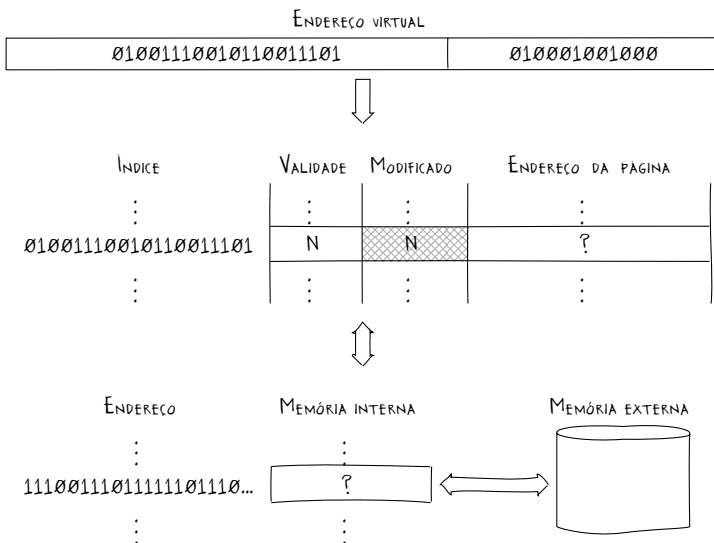
# Paginação

- ▶ Gerenciamento de memória
  - ▶ Todos os componentes da hierarquia de memória apresentam limitações quanto a capacidade
    - ▶ Registradores < Cache < Memória < Disco
  - ▶ Quando uma página solicitada não está na memória principal, ocorre uma falta de página (*page fault*)
    - ▶ 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*)

↑ %*Faltas*    $\longleftrightarrow$    ↓ *Desempenho*

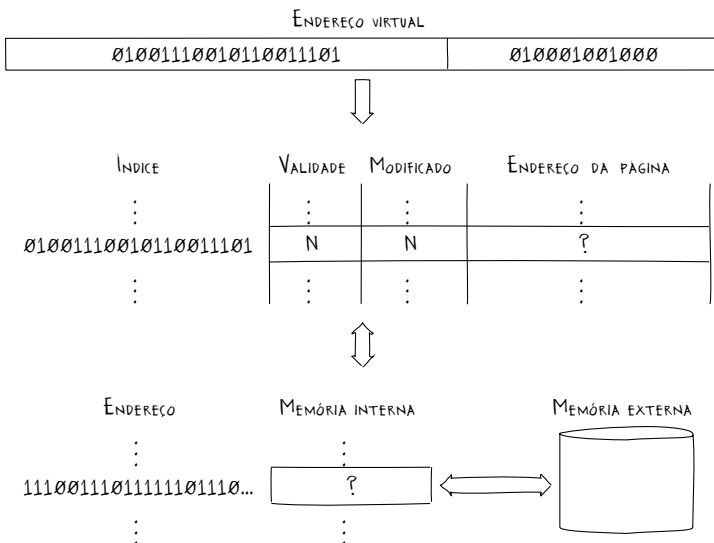
# Paginação

- ▶ Falta de página
  - ▶ A página solicitada não está disponível na memória



# Paginação

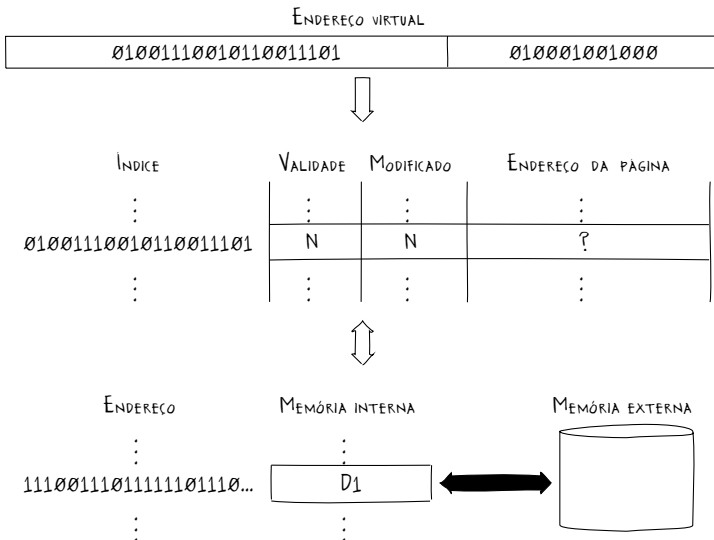
- ▶ Falta de página
  - ▶ A página solicitada é carregada na memória física





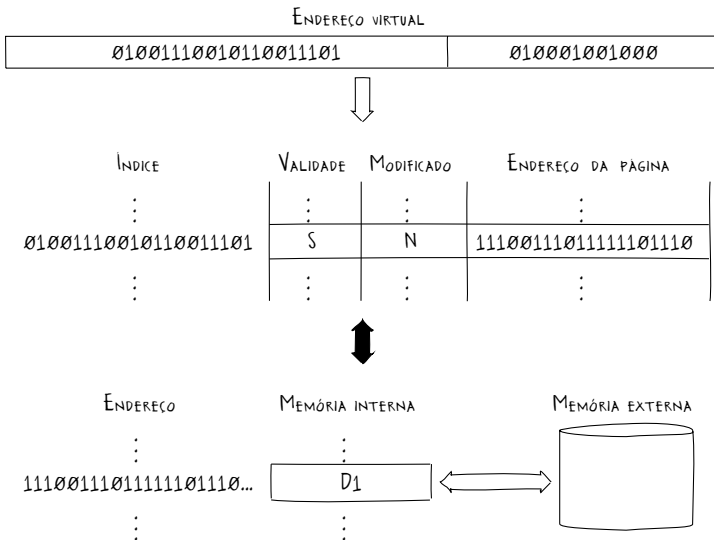
# Paginação

- ▶ Falta de página
  - ▶ A página solicitada é carregada na memória física



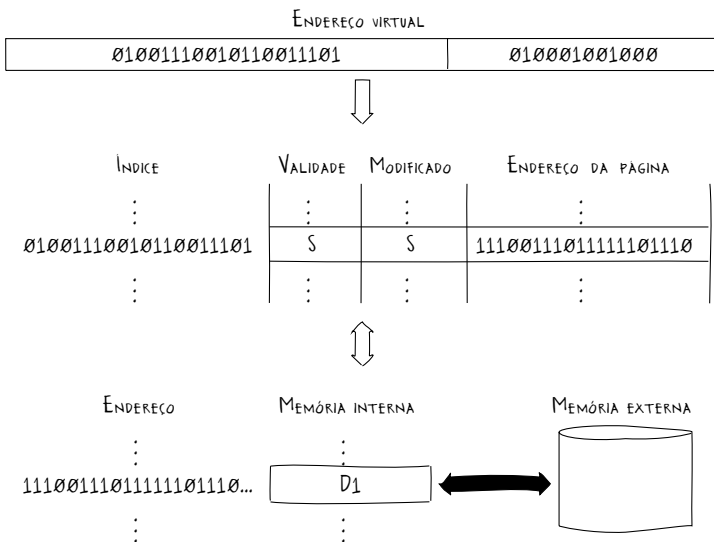
# Paginação

- ▶ Falta de página
  - ▶ A página solicitada é carregada na memória física



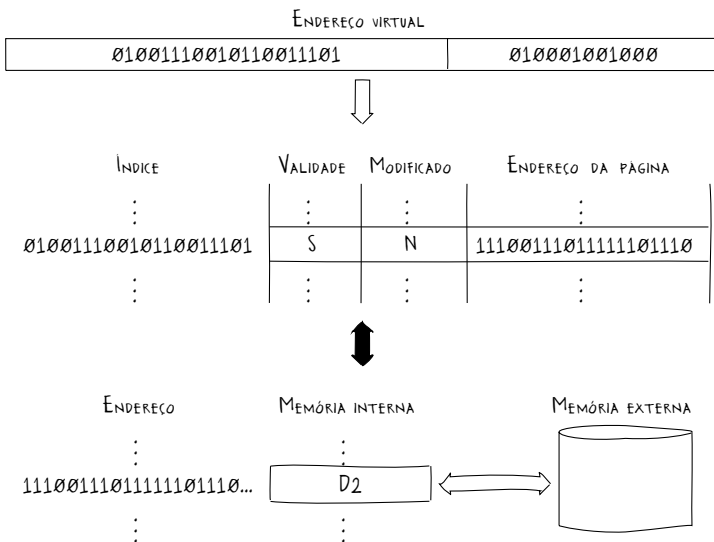
# Paginação

- ▶ Falta de página
  - ▶ A página será substituída por falta de espaço na memória



# Paginação

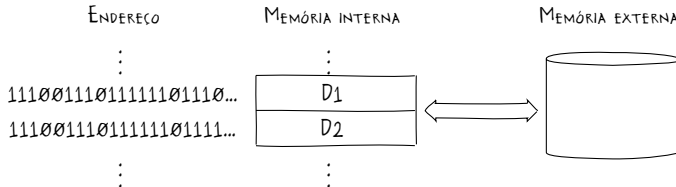
- ▶ Falta de página
  - ▶ A página será substituída por falta de espaço na memória



# Paginação

- ▶ Falta de página
  - ▶ Substituição por idade associada a cada página (LRU)

ÍNDICE	VALIDADE	MODIFICADO	IDADE	ENDEREÇO DA PÁGINA
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
01001110010110011101	S	N	0	111001110111111101110
01010100111011010010	S	N	3	111001110111111101111
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮



# Paginação

- ▶ 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*)

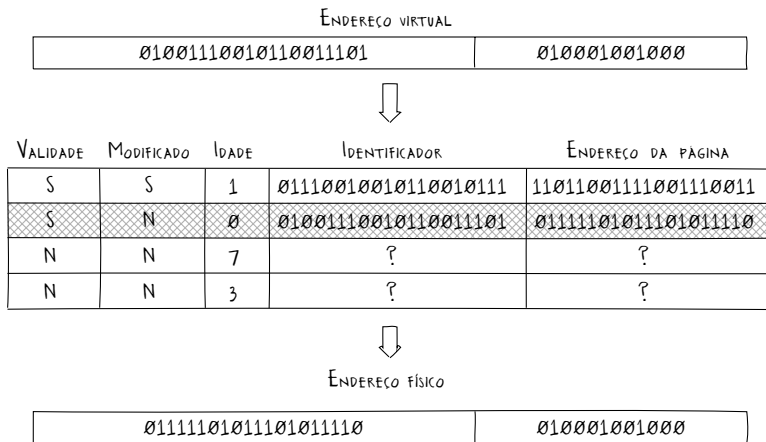
# Paginação

- ▶ 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

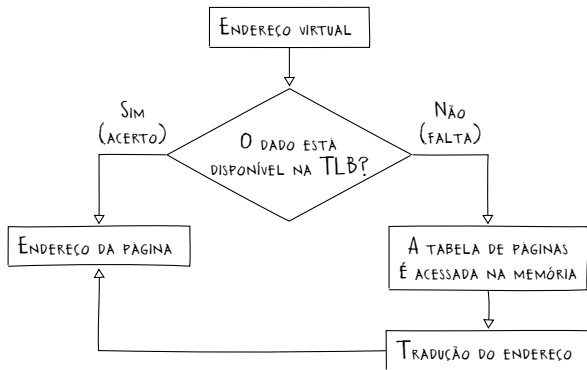
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
  - ▶ É uma cache para tradução de endereços virtuais com mapeamento das linhas totalmente associativo, reduzindo o acesso à memória para obtenção dos endereços físicos





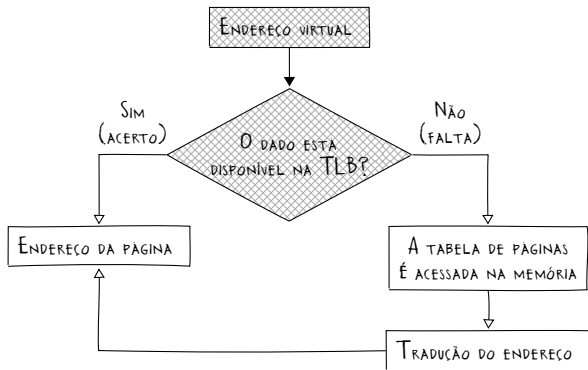
# Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
  - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual



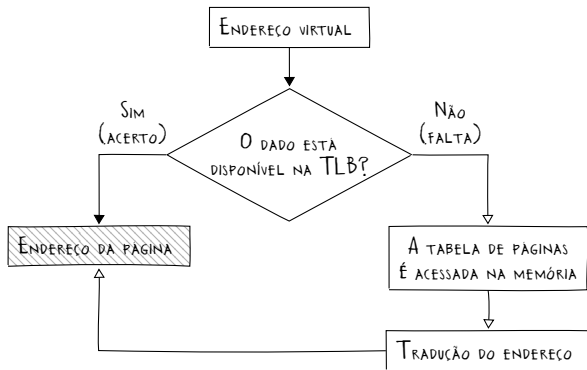
# Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
  - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual



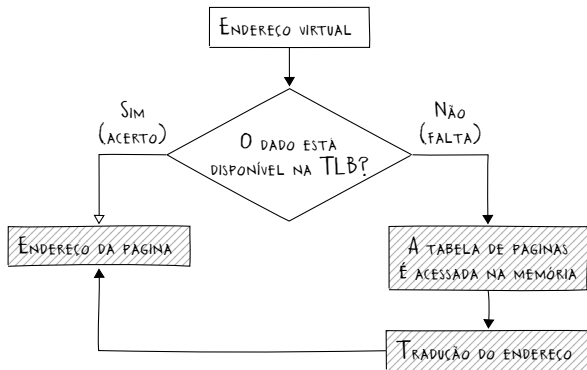
# Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
  - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual



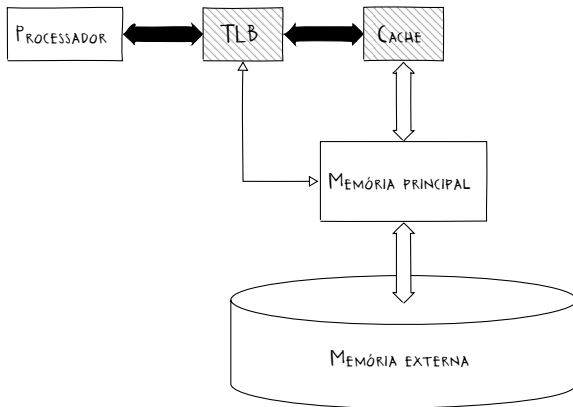
# Paginação

- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
  - ▶ Fluxo de tradução de endereço virtual



# Paginação

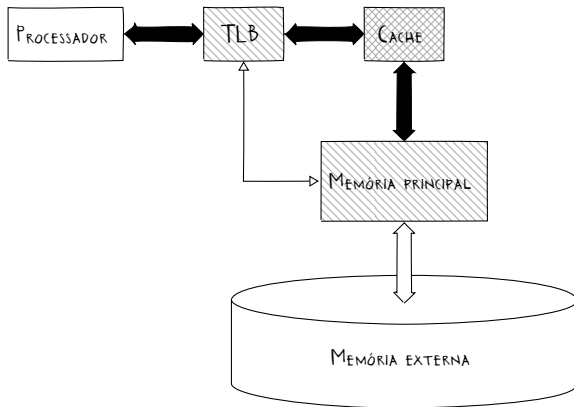
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
  - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A TRADUÇÃO DO ENDEREÇO VIRTUAL ESTÁ DISPONÍVEL NA TLB,  
ASSIM COMO O DADO/INSTRUÇÃO REFERENCIADO ESTÁ ARMAZENADO NA CACHE

# Paginação

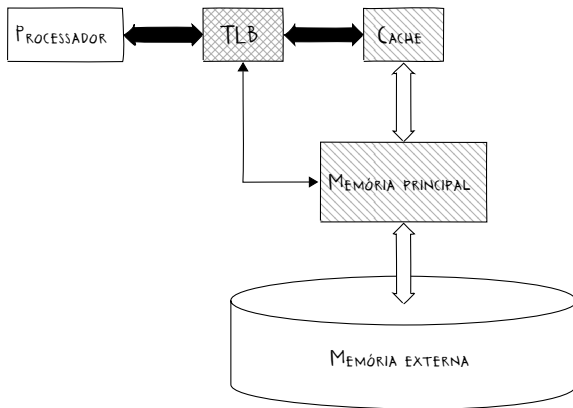
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
  - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A TRADUÇÃO DO ENDEREÇO VIRTUAL ESTÁ DISPONÍVEL NA TLB,  
MAS O DADO/INSTRUÇÃO PRECISA SER CARREGADO DA MEMÓRIA PRINCIPAL

# Paginação

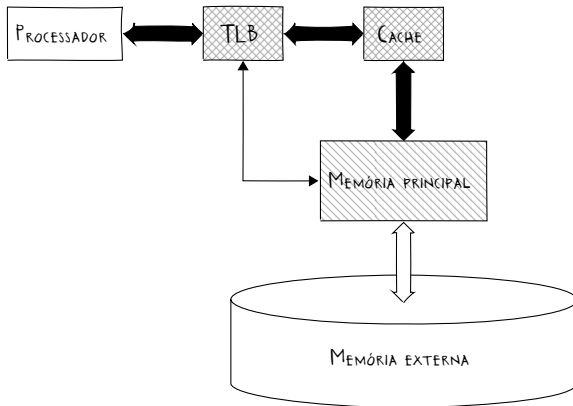
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
  - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



A TRADUÇÃO DO ENDEREÇO VIRTUAL NÃO ESTÁ NA TLB,  
CONTUDO A PÁGINA E O DADO/INSTRUÇÃO ESTÃO DISPONÍVEIS NAS MEMÓRIAS

# Paginação

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

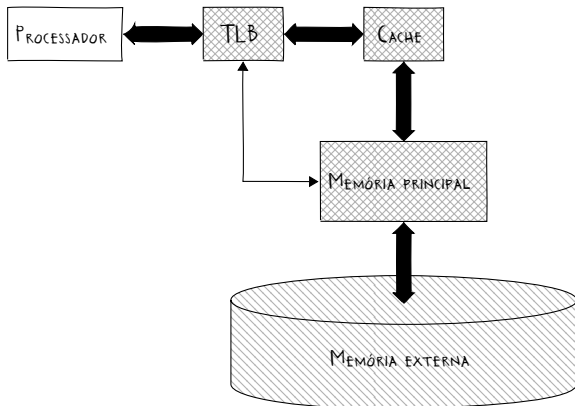


A TRADUÇÃO DO ENDEREÇO VIRTUAL NÃO ESTÁ NA TLB,  
COM FALTA DO DADO/INSTRUÇÃO NA CACHE E PÁGINA DISPONÍVEL NA MEMÓRIA



# Paginação

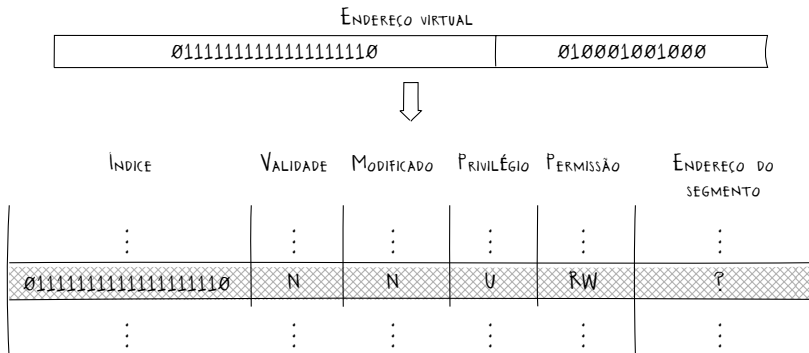
- ▶ *Translation-Lookaside Buffer (TLB)*
  - ▶ Cenários de tradução de endereços virtuais



O CORREM FALTAS EM TODOS OS NÍVEIS DA HIERARQUIA,  
DEMANDANDO O ACESSO À MEMÓRIA EXTERNA (PIOR CENÁRIO)

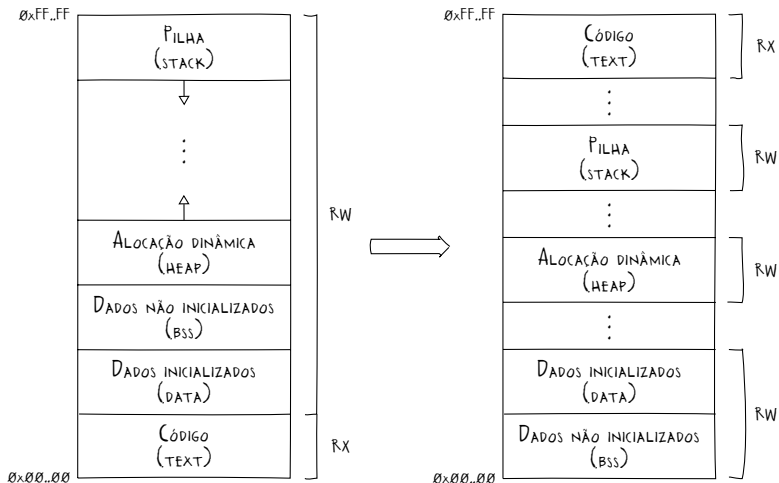
# Segmentação

- ▶ O que é segmentação de memória?
  - ▶ É um esquema de virtualização, que ao contrário das páginas que possuem tamanho fixo e sem configurabilidade, cria segmentos tamanho variável que podem ser definidos pelo compilador ou programador, com suas respectivas permissões de acesso



# 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

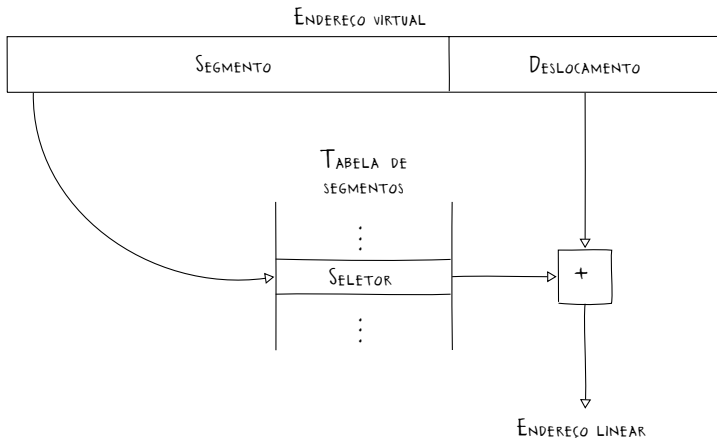
## ► Comparativo entre paginação e segmentação

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 criar uma segmentação paginada?

# Segmentação paginada

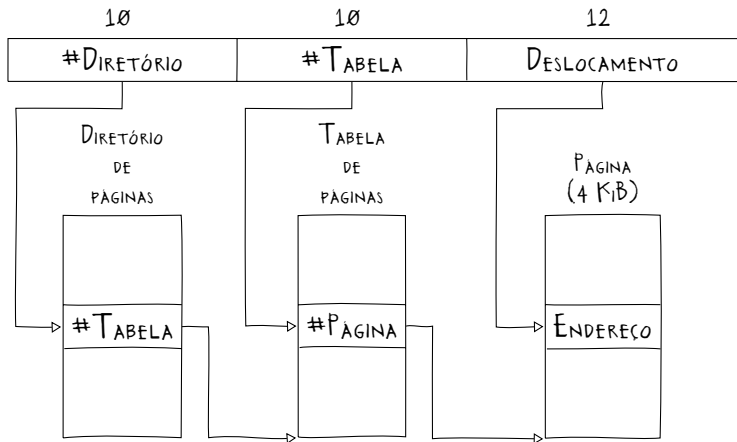
- Endereçamento virtual
  - É feita a indexação do segmento para obter o endereço linear, que será usado para acessar as suas páginas





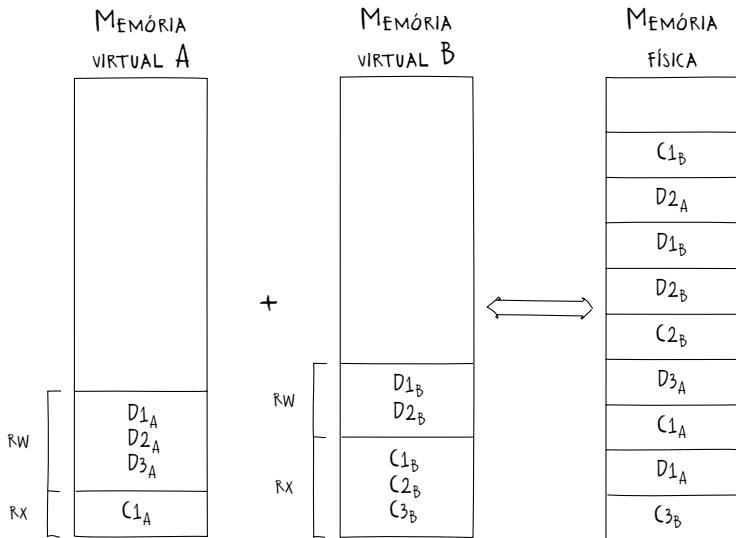
# Segmentação paginada

- ▶ Endereço linear
  - ▶ Para realizar a tradução do endereço físico, é feita a indexação do diretório e da tabela de páginas



# Segmentação paginada

## ► Memória virtual x Memória física



# Segmentação paginada

- ▶ Combina as características da paginação e da segmentação, sendo utilizada pelas principais arquiteturas
  - ▶ Multics
  - ▶ Intel x86
  - ▶ ARM
  - ▶ RISC-V
  - ▶ ...

# 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