Aula 15
Sistemas Operacionais I

Gerenciamento de Memória – Parte 3

Profa. Sarita Mazzini Bruschi e Prof. Julio Cezar Estrella

sarita@icmc.usp.br, jcezar@icmc.usp.br

Material adaptado de

Sarita Mazzini Bruschi

baseados no livro Sistemas Operacionais Modernos de A. Tanenbaum

Memória Virtual
Paginação

- Algumas questões:
  - Onde armazenar a tabela de páginas?
  - Qual a estrutura de uma entrada na tabela de páginas?
  - Quantas páginas reais serão alocadas a um processo?
  - Quando uma página deve ser carregada para a memória?
  - Como trazer uma página para a memória?
  - Como liberar espaço na memória?

Memória Virtual
Paginação

- Algumas questões:
  - Onde armazenar a tabela de páginas?
  - Qual a estrutura de uma entrada na tabela de páginas?
  - Quantas páginas reais serão alocadas a um processo?
  - Quando uma página deve ser carregada para a memória?
  - Como trazer uma página para a memória?
  - Como liberar espaço na memória?

Memória Virtual
Paginação

- A Tabela de páginas pode ser armazenada de três diferentes maneiras:
  - Em um conjunto de registradores, se a memória for pequena;
    - Vantagem: rápido
    - Desvantagem: precisa carregar toda a tabela nos registradores a cada chaveamento de contexto
  - Na própria memória RAM → MMU gerencia utilizando dois registradores:
    - Registrador Base da tabela de páginas (PTBR – *page table base register*): indica o endereço físico de memória onde a tabela está alocada;
    - Registrador Limite da tabela de páginas (PTLR – *page table limit register*): indica o número de entradas da tabela (número de páginas);
    - Precisa de dois acessos à memória: um para acessar a tabela de páginas e outro para acessar a posição de memória;

Memória Virtual
Paginação

- Em uma memória *cache* na MMU
  - Também conhecida como TLB (*Translation Lookaside Buffer* - *buffer* de tradução dinâmica*)*;
  - Hardware especial para mapear endereços virtuais para endereços reais sem ter que passar pela tabela de páginas na memória principal;
  - Melhora o desempenho;

Memória Virtual
Paginação

- Memória Associativa (TLB)
  - De 64 a 4096 entradas

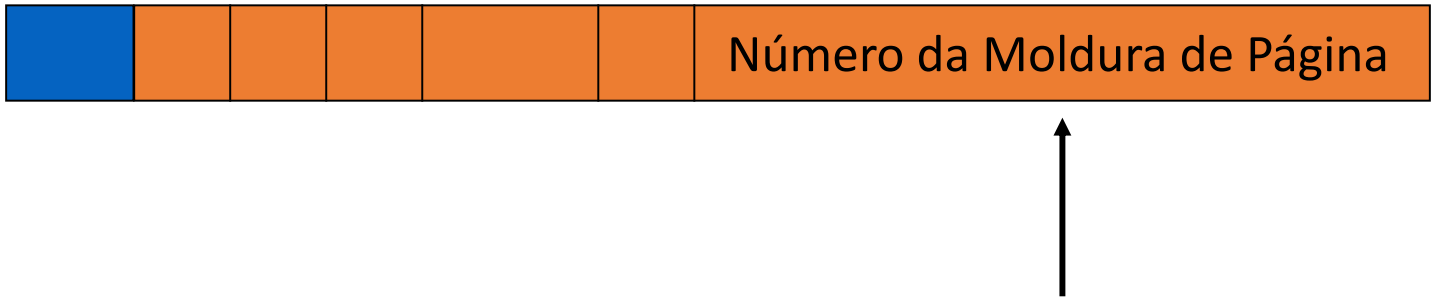
Bit R	**Página Virtual**	***Bit* M**	***Bits* de Proteção**	**Página Física**
1	140	1	RW	31
1	20	0	R X	38
1	130	1	RW	29
1	129	1	RW	62
1	19	0	R X	50
1	21	0	R X	45
1	860	1	RW	14
1	861	1	RW	75

Memória Virtual
Paginação

- Algumas questões:
  - Onde armazenar a tabela de páginas?
  - Qual a estrutura de uma entrada na tabela de páginas?
  - Quantas páginas reais serão alocadas a um processo?
  - Quando uma página deve ser carregada para a memória?
  - Como trazer uma página para a memória?
  - Como liberar espaço na memória?

Memória Virtual
Paginação

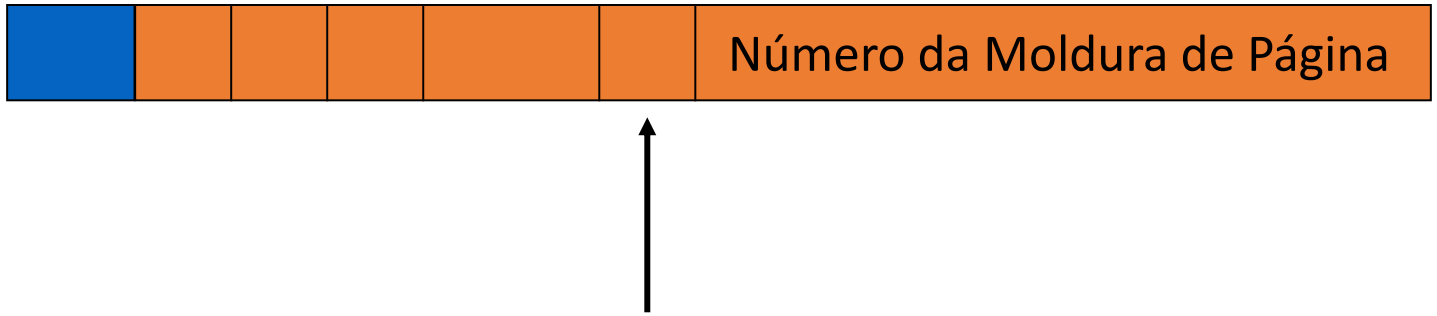
- Estrutura de uma tabela de páginas (normalmente 32 bits)



Identifica a página real;
Campo mais importante;

Memória Virtual
Paginação

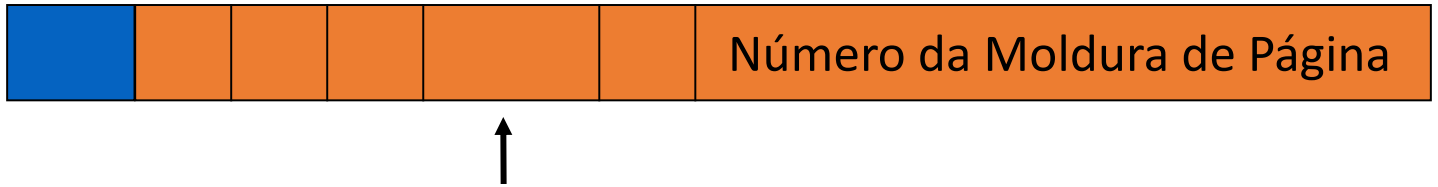
- Estrutura de uma tabela de páginas (normalmente 32 bits)



***Bit* de Residência:**
Se valor igual 1, então entrada válida para uso;
Se valor igual 0, então entrada inválida, pois
página virtual correspondente não está na memória;

Memória Virtual
Paginação

- Estrutura de uma tabela de páginas (normalmente 32 bits)



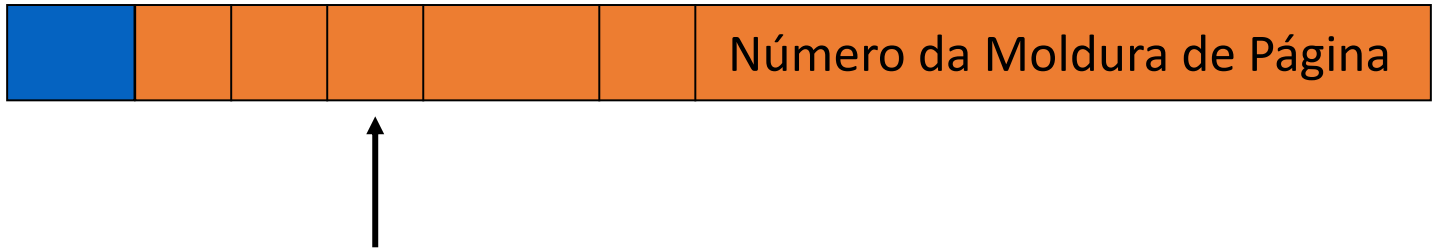
***Bits* de Proteção:**
Indicam tipos de acessos permitidos:

1 bit → 0 – leitura/escrita
1 – leitura

3 bits → 0 – Leitura
1 – Escrita
2 - Execução

Memória Virtual
Paginação

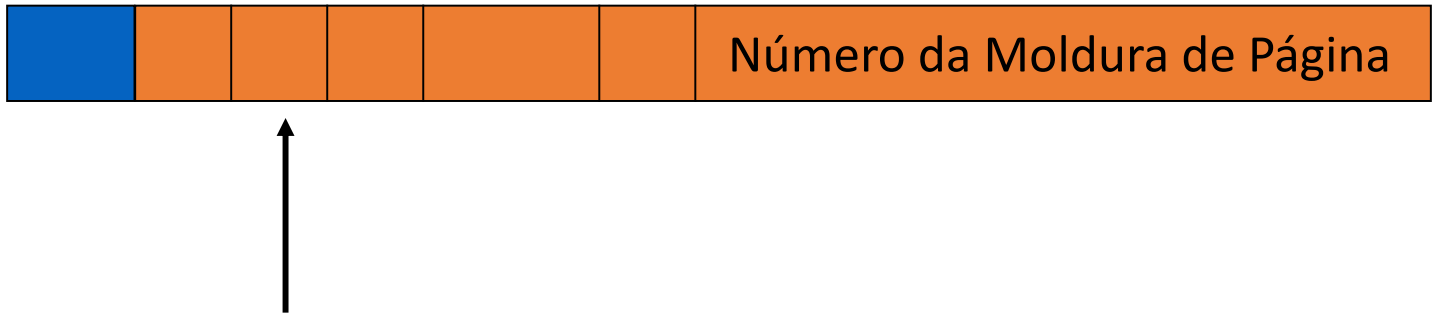
- Estrutura de uma tabela de páginas (normalmente 32 bits)



***Bit* de Modificação (Bit M):**
Controla o uso da página;
Se valor igual a 1, página foi escrita;
página é copiada para o disco
Se valor igual a 0, página não foi modificada;
página não é copiada para o disco;

Memória Virtual
Paginação

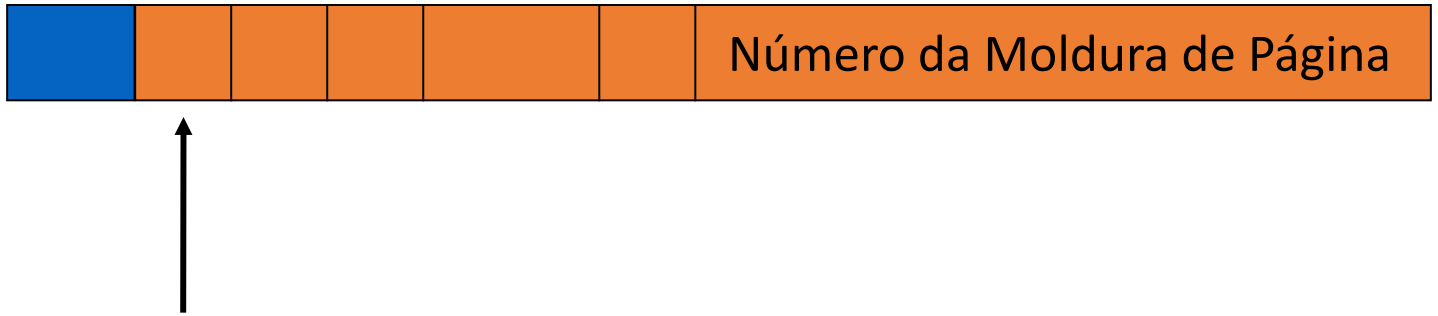
- Estrutura de uma tabela de páginas (normalmente 32 bits)



***Bit* de Referência (Bit R):**
Controla o uso da página;
Auxilia o SO na escolha da página que deve deixar a MP (RAM);
Se valor igual a 1, página foi referenciada (leitura/escrita);
Se valor igual a 0, página não referenciada;

Memória Virtual
Paginação

- Estrutura de uma tabela de páginas (normalmente 32 bits)



***Bit* de *Cache*:**
Necessário quando os dispositivos de entrada/saída são mapeados na memória e não em um endereçamento específico de E/S;

Memória Virtual
Paginação

- Algumas questões:
  - Onde armazenar a tabela de páginas?
  - Qual a estrutura de uma entrada na tabela de páginas?
  - Quantas páginas reais serão alocadas a um processo?
  - Quando uma página deve ser carregada para a memória?
  - Como trazer uma página para a memória?
  - Como liberar espaço na memória?

Memória Virtual
Paginação - Alocação de Páginas

- Quantas páginas reais serão alocadas a um processo?
- Duas estratégias:
  - Alocação fixa ou estática: cada processo tem um número máximo de páginas reais, definido quando o processo é criado;
    - O limite pode ser igual para todos os processos;
    - Vantagem: simplicidade;
    - Desvantagens:
      - número muito pequeno de páginas reais pode causar muita paginação (troca de páginas da memória principal);
      - número muito grande de páginas reais causa desperdício de memória principal;

Memória Virtual
Paginação - Alocação de Páginas

- Quantas páginas reais serão alocadas a um processo?
- Duas estratégias (continuação):
  - Alocação variável ou dinâmica: número máximo de páginas reais alocadas ao processo varia durante sua execução;
    - Vantagem:
      - processos com elevada taxa de paginação podem ter seu limite de páginas reais ampliado;
      - processos com baixa taxa de paginação podem ter seu limite de páginas reais reduzido;
    - Desvantagem: monitoramento constante;

Memória Virtual
Paginação

- Algumas questões:
  - Onde armazenar a tabela de páginas?
  - Qual a estrutura de uma entrada na tabela de páginas?
  - Quantas páginas reais serão alocadas a um processo?
  - Quando uma página deve ser carregada para a memória?
  - Como trazer uma página para a memória?
  - Como liberar espaço na memória?

Memória Virtual
Paginação - Busca de Página

- Política de busca de página: determina quando uma página deve ser carregada para a memória
- Três estratégias:
  - **Paginação simples**:
    - Todas as páginas virtuais do processo são carregadas para a memória principal;
    - Sempre todas as páginas são válidas;
  - **Paginação por demanda** (*Demand Paging*):
    - Apenas as páginas referenciadas são carregadas na memória principal;
    - Quais páginas virtuais foram carregadas → Bit de controle (bit de residência);
    - Página inválida;
  - **Paginação antecipada** (*Antecipatory Paging*)
    - Carrega para a memória principal, além da página referenciada, outras páginas que podem ou não ser necessárias para o processo

Memória Virtual
Paginação

- Algumas questões:
  - Onde armazenar a tabela de páginas?
  - Qual a estrutura de uma entrada na tabela de páginas?
  - Quantas páginas reais serão alocadas a um processo?
  - Quando uma página deve ser carregada para a memória?
  - Como trazer uma página para a memória?
  - Como liberar espaço na memória?

Memória Virtual
Paginação - Busca de Página

- Página inválida: MMU gera uma interrupção de proteção e aciona o sistema operacional;
  - Se a página está fora do espaço de endereçamento do processo, o processo é abortado;
  - Se a página ainda não foi carregada na memória principal, ocorre uma **falta de página** *(page fault*)*;*

Memória Virtual
Paginação - Busca de Página

- **Falta de Página**:
  - Processo é suspenso e seu descritor é inserido em uma **fila especial** – fila dos processos esperando uma página virtual;
  - Uma página real livre deve ser alocada;
  - A página virtual acessada deve ser localizada no disco;
  - Operação de leitura de disco, indicando o endereço da página virtual no disco e o endereço da página real alocada;

Memória Virtual
Paginação - Busca de Página

- Após a leitura do disco:
  - Tabela de páginas do processo é corrigida para indicar que a página virtual agora está válida e está na página real alocada;
    - *Pager*: carrega páginas especificas de um processo do disco para a memória principal;
  - O descritor do processo é retirado da **fila especial** e colocado na fila do processador;

Memória Virtual
Paginação

- Algumas questões:
  - Onde armazenar a tabela de páginas?
  - Qual a estrutura de uma entrada na tabela de páginas?
  - Quantas páginas reais serão alocadas a um processo?
  - Quando uma página deve ser carregada para a memória?
  - Como trazer uma página para a memória?
  - Como liberar espaço na memória?

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

Memória Virtual

0	A
1	B
2	C
3	D
4	E
5	F
6	G
7	H

Tabela de Páginas Simplificada

0		**i**
1		**i**
2	10	**v**
3	3	**v**
4		**i**
5		**i**
6	4	**v**
7		**i**

Página Virtual

Página Real

Memória Principal

0	
1	
2	
3	**D**
4	**G**
5	
6	
7	
8	
9	
10	**C**
11	
12	
13	
14	
15	

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Se todas as páginas estiverem ocupadas, uma página deve ser retirada: página vítima;
- Exemplo:
  - Dois processos P1 e P2, cada um com 4 páginas virtuais;
  - Memória principal com 6 páginas;

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

Memória Virtual P1

0	A
1	B
2	C
3	D

Tabela de Páginas P1 Simplificada

0	1	**v**
1	5	**v**
2		**i**
3	0	**v**

Memória Principal

0	**D**
1	**A**
2	**F**
3	**E**
4	**G**
5	**B**

3 páginas de cada processo

Memória Virtual P2

0	E
1	F
2	G
3	H

Tabela de Páginas P2 Simplificada

0	3	**v**
1	2	**v**
2	4	**v**
3		**i**

P2 tenta acessar página 3!

Falta de Página!

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

Memória Virtual P1

0	A
1	B
2	C
3	D

Tabela de Páginas P1 Simplificada

0	1	**v**
1	5	**v**
2		**i**
3	0	**v**

Memória Principal

0	**D**
1	**A**
2	**F**
3	**E**
4	**H**
5	**B**

3 páginas de cada processo

Memória Virtual P2

0	E
1	F
2	G
3	H

Tabela de Páginas P2 Simplificada

0	3	**v**
1	2	**v**
2		**i**
3	4	**v**

Página 2 (virtual) do P2 é escolhida como vítima!

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmos:
  - Ótimo;
  - NRU;
  - FIFO;
  - Segunda Chance;
  - Relógio;
  - LRU;
  - *Working set*;
  - *WSClock;*

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo Ótimo:
  - Retira da memória a página que tem menos chance de ser referenciada;
    - Praticamente impossível de se saber;
    - Impraticável;
    - Usado em simulações para comparação com outros algoritmos;

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo *Not Recently Used Page Replacement* (NRU) ou *Não Usada Recentemente* (NUR)
  - Troca as páginas não utilizadas recentemente:
  - 02 bits associados a cada página → R (referência) e M (modificação)
    - Classe 0 (R = 0 e M = 0) → não referenciada, não modificada;
    - Classe 1 (R = 0 e M = 1) → não referenciada, modificada;
    - Classe 2 (R = 1 e M = 0) → referenciada, não modificada;
    - Classe 3 (R = 1 e M = 1) → referenciada, modificada;
  - R e M são atualizados a cada referência à memória;

Uma vez que a página foi lida, o valor do bit R será sempre igual a 1 até que o SO reinicialize-o

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- NRU:
  - Periodicamente, o bit R é limpo para diferenciar as páginas que não foram referenciadas recentemente;
    - A cada *tick* do relógio ou interrupção de relógio;
    - Classe 3 → Classe 1;
  - Vantagens: fácil de entender, eficiente para implementar e fornece bom desempenho;

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo *First-in First-out Page Replacement* (FIFO)
  - SO mantém uma listas das páginas correntes na memória;
    - A página no início da lista é a mais antiga e a página no final da lista é a mais nova;
  - Simples, mas pode ser ineficiente, pois uma página que está em uso constante pode ser retirada;
  - Pouco utilizado;

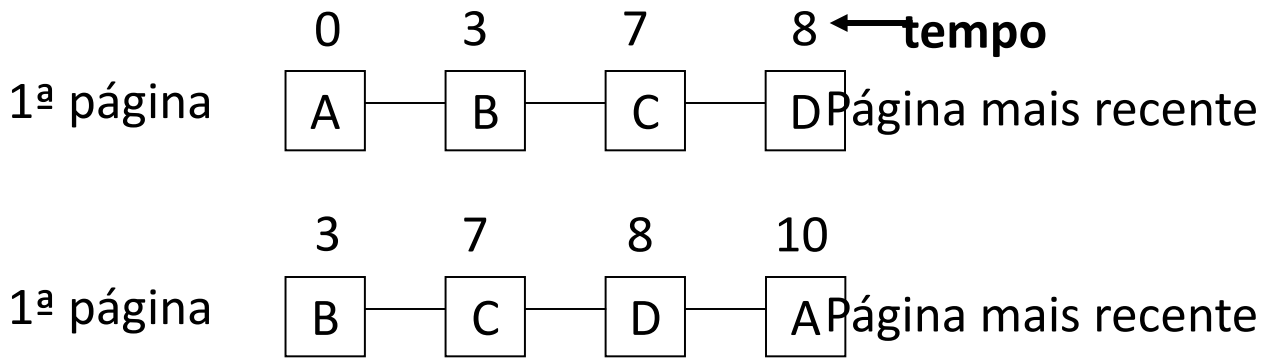
Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo da Segunda Chance
  - FIFO + *bit* R;
  - Página mais velha é candidata em potencial;

Se o bit R==0,

então página é retirada da memória,

senão R=0 e se dá uma nova chance à página colocando-a no final da lista;



<u>Se</u> página A com R==1; e falta de página em tempo 10;
<u>Então</u> R=0 e página A vai para final da lista;

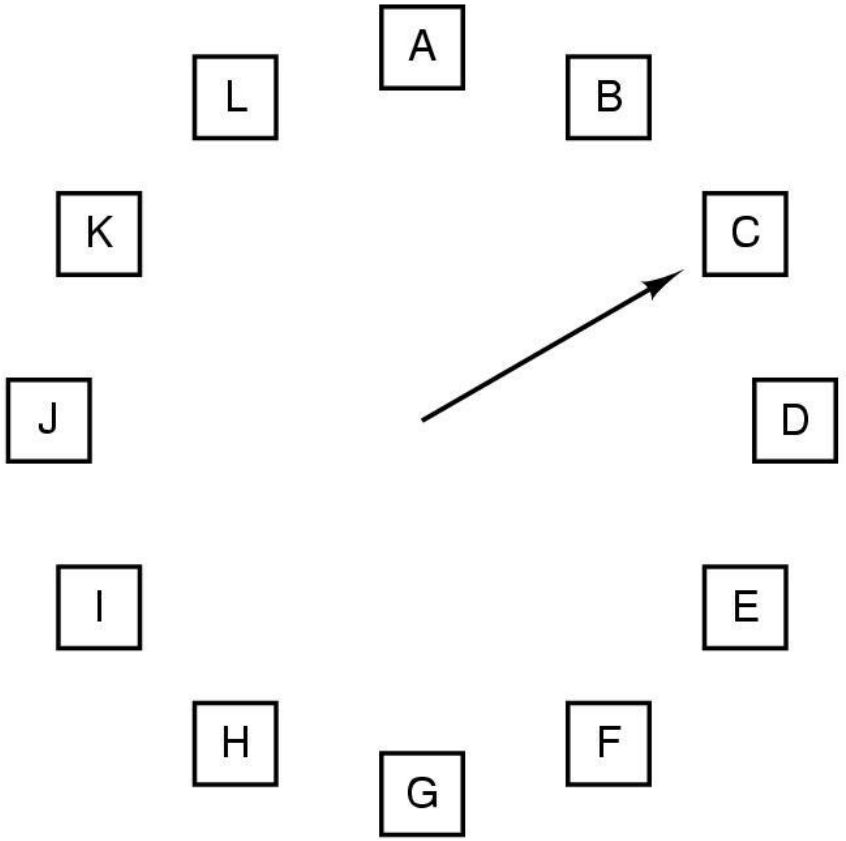
Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo do Relógio
  - Lista circular com ponteiro apontando para a página mais antiga
  - Algoritmo se repete até encontrar R=0;

Se R==0	Se R==1
•troca de página •desloca o ponteiro	•R = 0 •desloca o ponteiro •continua busca

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo do Relógio



When a page fault occurs, the page the hand is pointing to is inspected. The action taken depends on the R bit:

R = 0: Evict the page

R = 1: Clear R and advance hand

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

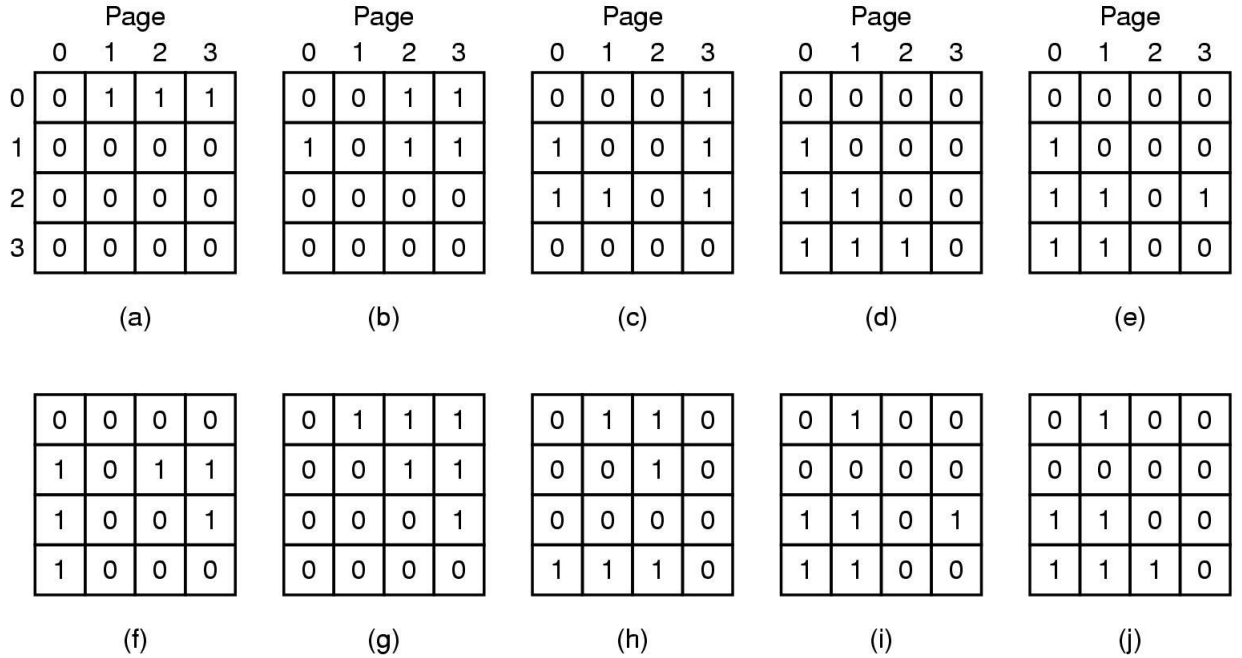
- Algoritmo *Least Recently Used Page Replacement* (LRU) ou *Menos Recentemente Usada* (MRU)
  - Troca a página menos referenciada/modificada recentemente;
  - Alto custo
    - Lista encadeada com as páginas que estão na memória, com as mais recentemente utilizadas no início e as menos utilizadas no final;
    - A lista deve ser atualizada a cada referência da memória;

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo *Least Recently Used* (LRU)
  - Pode ser implementado tanto por hardware quanto por software:
    - Hardware: MMU deve suportar a implementação LRU;
      - 1a. opção
        - Contador em hardware (64 *bits*) – conta instruções executadas;
        - Após cada referência à memória, o valor do contador é armazenado na entrada da tabela de páginas referente à página acessada;
        - Quando ocorre falta de página, o SO examina todos os contadores e escolhe a página que tem o menor valor

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- LRU – Hardware - 2a. Opção
  - Matriz *n* x *n* bits
  - Quando se faz uma referência à página k ->
    todos os bits da linha k recebem valor 1
    todos os bits da coluna k recebem valor 0



0 1 2 3 2 1 0 3 2 3

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo *Least Recently Used Page Replacement* (LRU)
  - Pode ser implementado tanto por hardware quanto por software:
    - Software: duas maneiras
      - NFU (*Not frequently used*) ou LFU (*least frequently used*);
      - *Aging* (Envelhecimento);

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

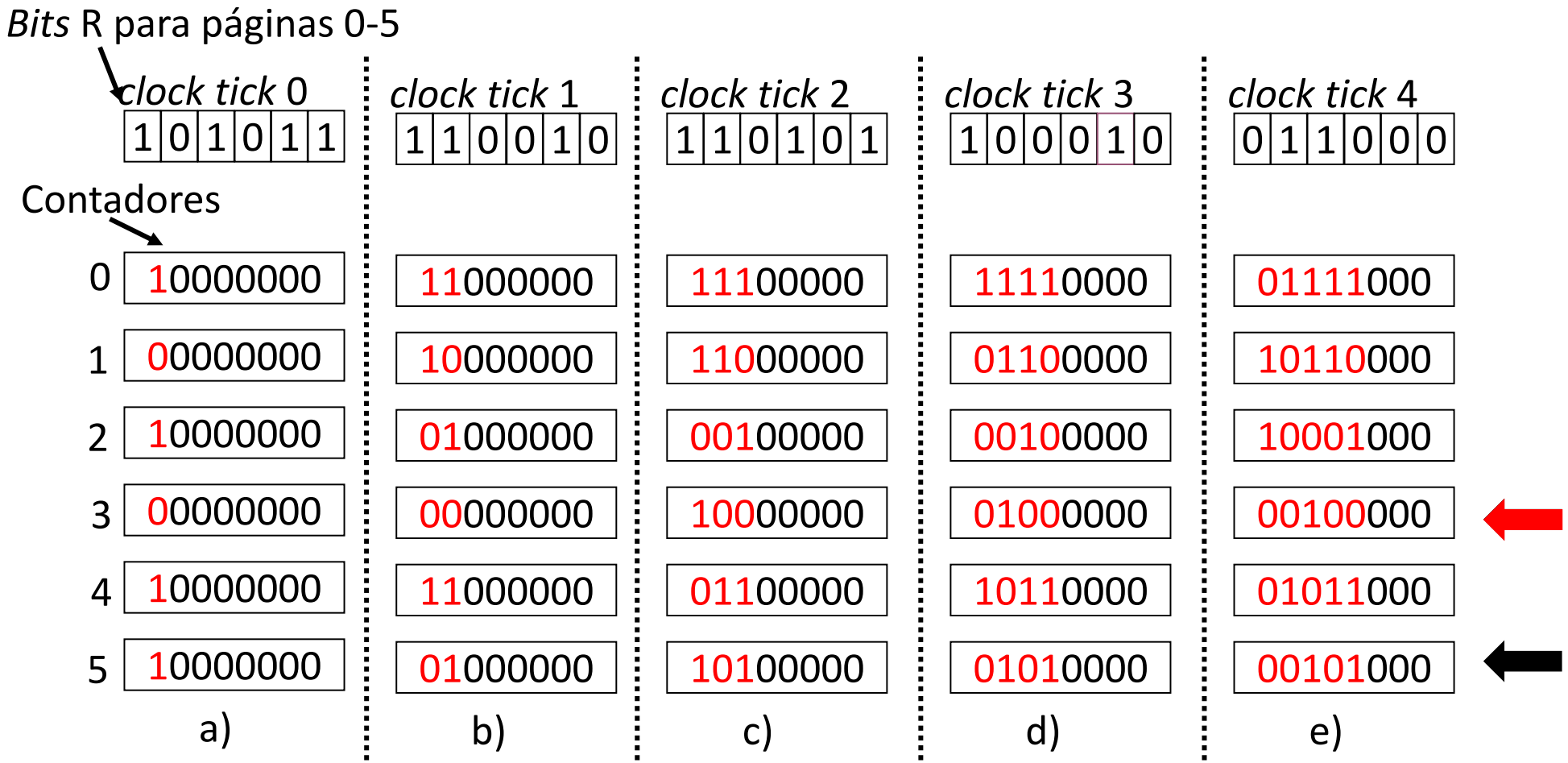
- Software: NFU ou LFU (*least*)
  - Para cada página existe um contador → iniciado com zero e incrementado a cada referência à pagina;
    - Página com menor valor do contador é candidata a troca;
    - Esse algoritmo não se esquece de nada
      - Problema: pode retirar páginas que estão sendo referenciadas com frequência;
        - Compilador com vários passos: passo 1 tem mais tempo de execução que os outros passos → páginas do passo 1 terão mais referências armazenadas;

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Software: Algoritmo *aging* (envelhecimento)
  - Modificação do NFU, resolvendo o problema descrito anteriormente;
    - Além de saber **quantas vezes** a página foi referenciada, também controla **quando** ela foi referenciada;

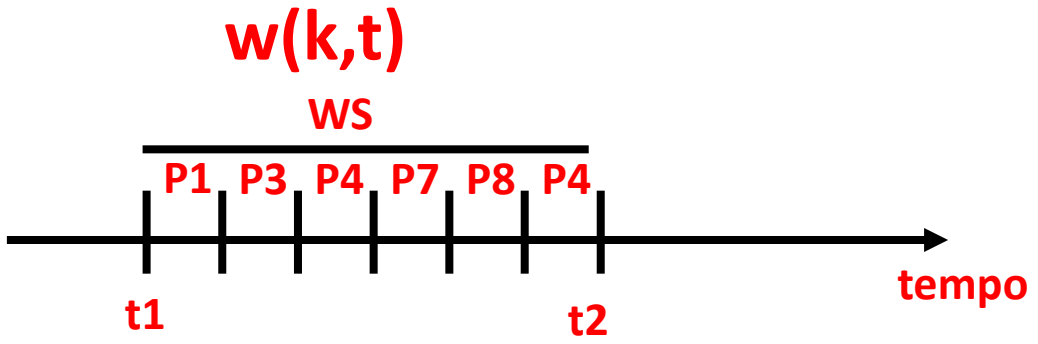
Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo *aging*



Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo *Working Set (WS)*:
  - Paginação por demanda → páginas são carregadas na memória somente quando são necessárias;
  - Pré-paginação → *Working set*
    - Carregar um conjunto de páginas que um processo está efetivamente utilizando (referenciando) em um determinado tempo t antes de ele ser posto em execução;



Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo *Working Set (WS)*:
  - Objetivo principal: reduzir a falta de páginas
    - Um processo só é executado quando todas as páginas necessárias no tempo ***t*** estão carregadas na memória;
    - SO gerencia quais páginas estão no *Working Set;*
  - Para simplificar → o *working set* pode ser visto como o conjunto de páginas que o processo referenciou durante os últimos **t** segundos de tempo;
  - Utiliza *bit* R e o tempo de relógio (tempo virtual) da última vez que a página foi referenciada;

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

Tempo virtual atual (CVT): 2204
age = CVT – TLU
(Ex.: 2204-2084 = 120)
τ = múltiplos *clock ticks*

- Algoritmo Working Set

* Se todas as páginas estiverem com R=1, uma página é escolhida aleatoriamente;
** Se todas as páginas estiverem no WS, a página mais velha com R=0 é escolhida;

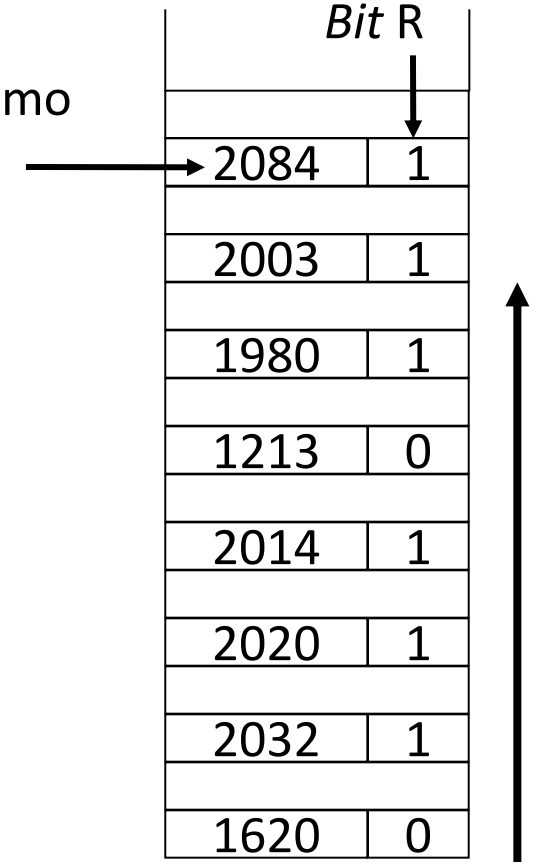


Tabela de Páginas

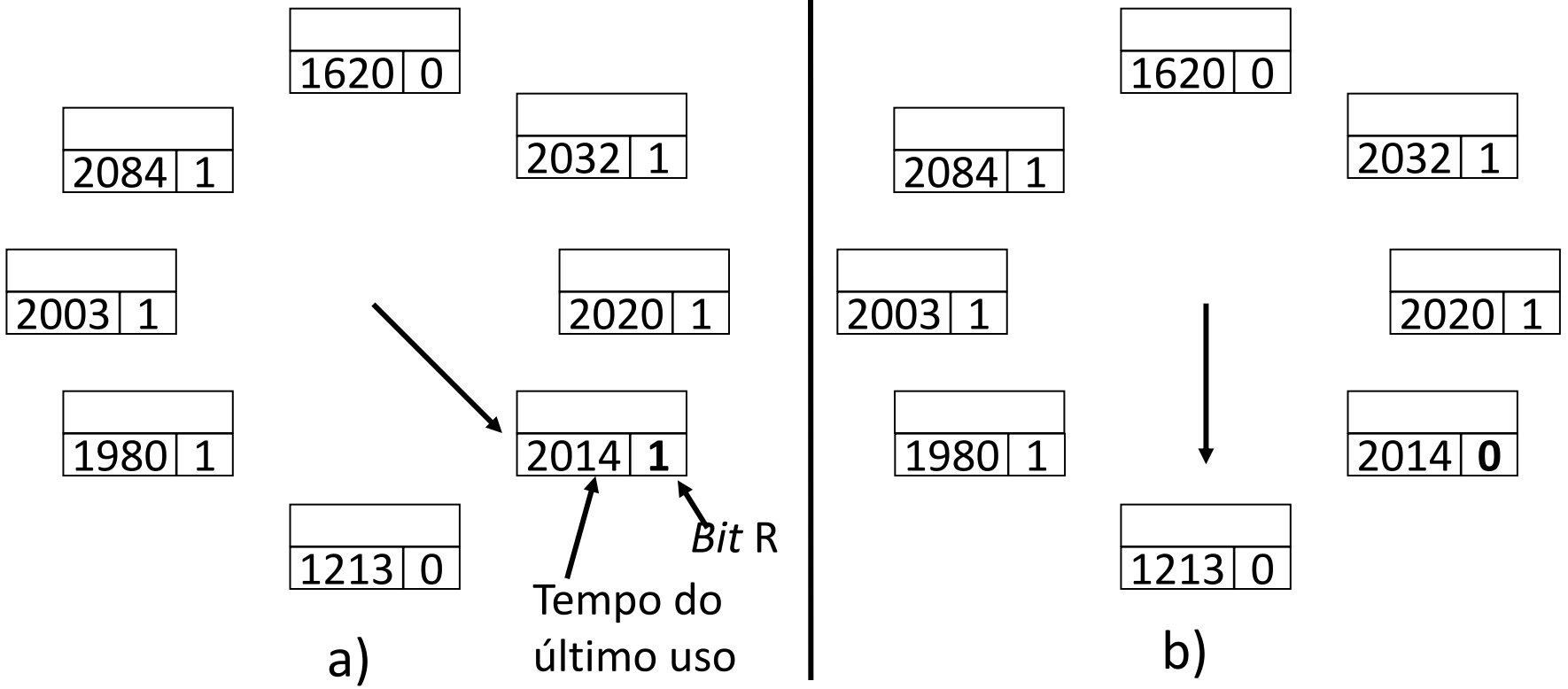
Percorrer as páginas examinando os bit R;
Se (R==1)*
  página foi referenciada;
  faz TLU da página igual ao CVT;
Se (R==0 e *age* > τ)
  página não está no *working set*;
  remove a página;
Se (R==0 e *age* <= τ) **
  página está no *working set*;
  guarda página com maior *age*;

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo *WSClock*:
  - *Clock* + *Working Set*;
  - Lista circular de molduras de páginas formando um anel a cada página carregada na memória;
  - Utiliza *bit R* e o tempo da última vez que a página foi referenciada;
  - *Bit M* utilizado para agendar escrita em disco;

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

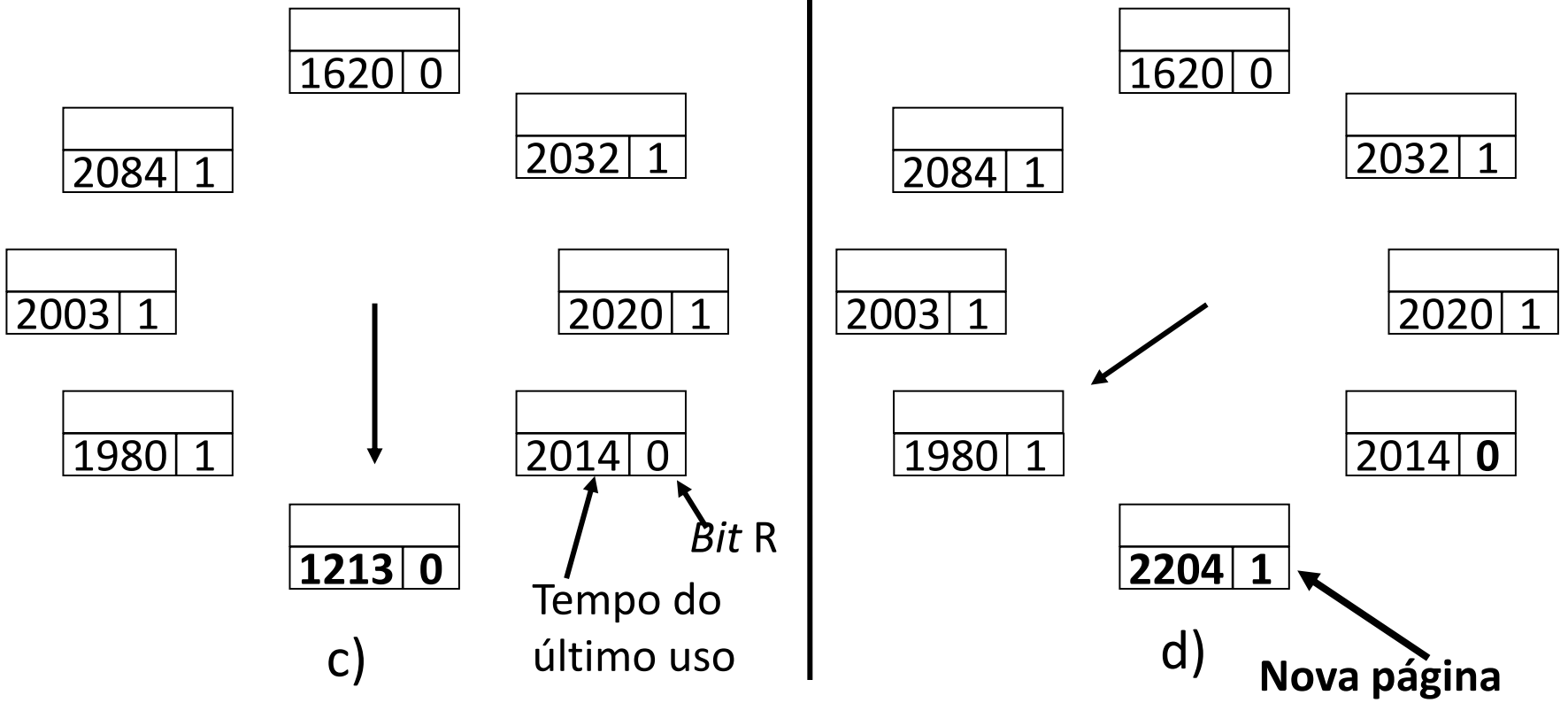
- Algoritmo *WSClock*:



Se R==1
Então R=0 e ponteiro avança

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

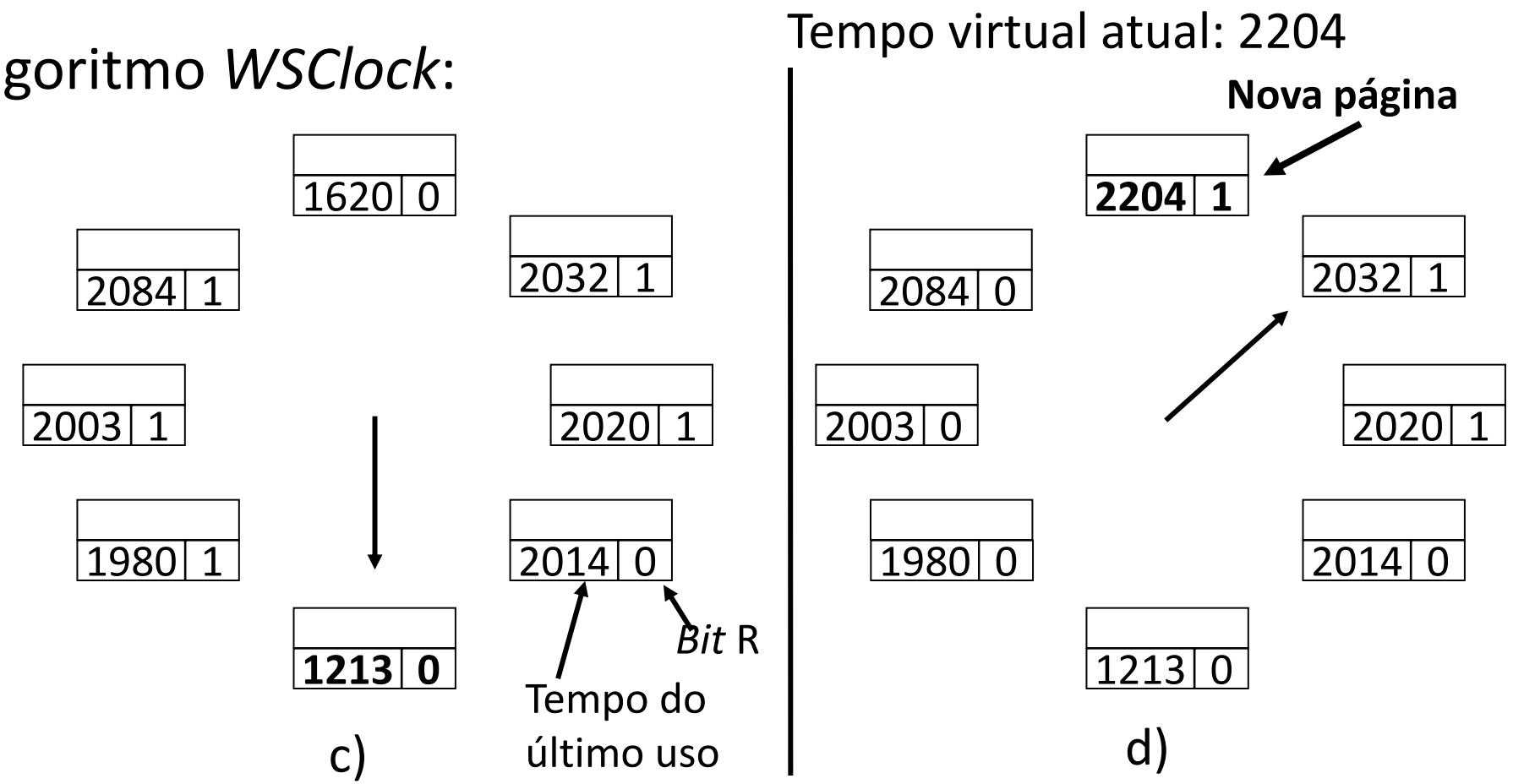
- Algoritmo *WSClock*:



Se R==0 e age > t e M==0
não agenda escrita → troca

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

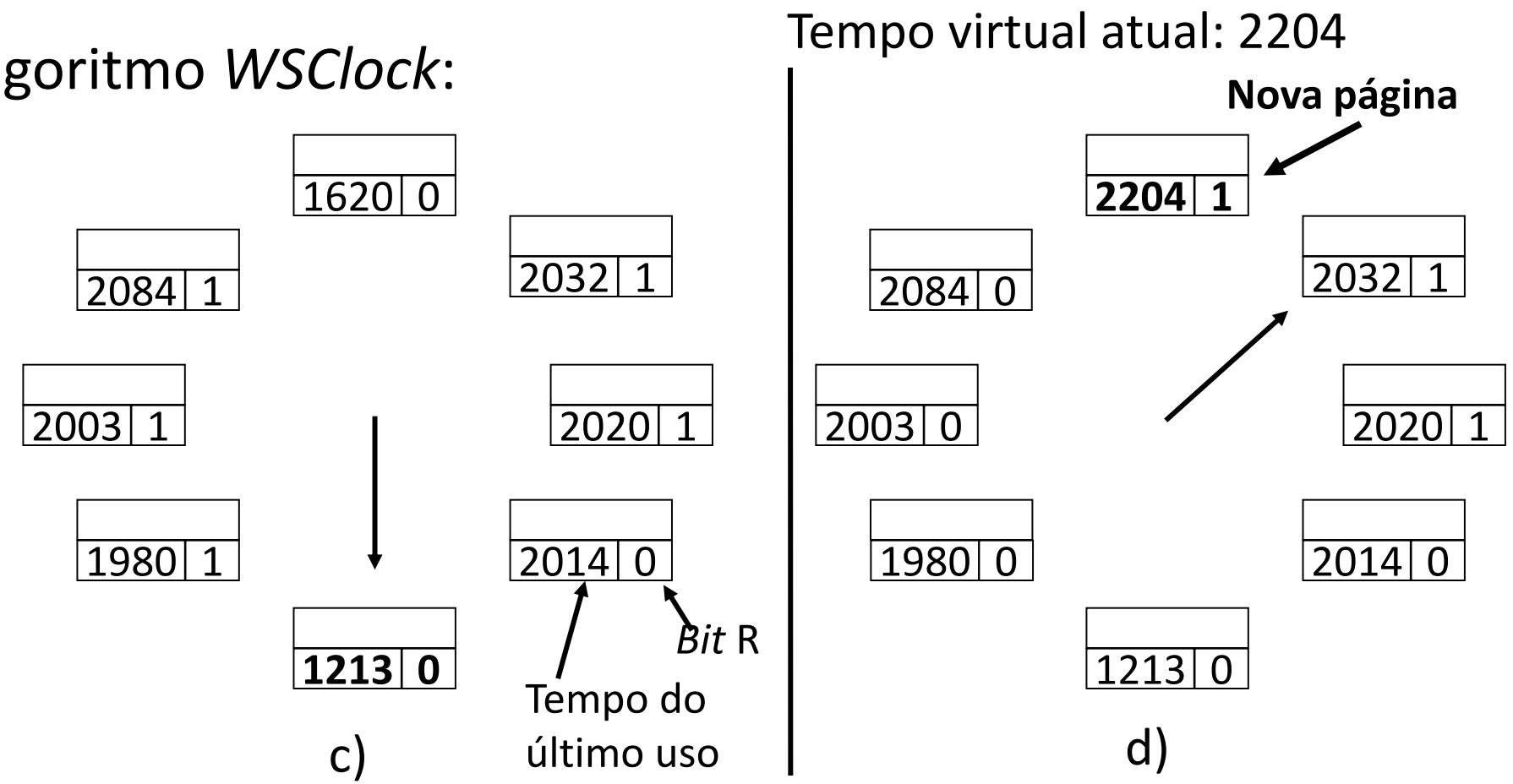
- Algoritmo *WSClock*:



Se R==0 e age > t e M==1
agenda escrita e continua procura

Memória Virtual
Paginação – Troca de Página

- Algoritmo *WSClock*:



Se R==0 e age > t e M==1
agenda escrita e continua procura