Curso de Engenharia de Computação
Sistemas Operacionais

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA
MAUÁ

Gerenciamento de Memória – Parte II

Memória Virtual – Algoritmos de reposição de páginas

Slides da disciplina Sistemas Operacionais
Curso de Engenharia de Computação
Instituto Mauá de Tecnologia – Escola de Engenharia Mauá
Prof. Marco Antonio Furlan de Souza

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA
MAUÁ

- **Conceitos**
  - Quando ocorre uma **falta de página**, o **sistema operacional** deve **escolher** uma **página para remover** da **memória para** liberar **espaço** para a **página** a ser **inserida** (por causa de uma referência de memória);
  - Embora seja possível escolher uma página aleatória para ser removida em cada falta de página, o desempenho do sistema aumenta se uma **página** que **não** é **muito utilizada** for **escolhida**;
  - Existem **processos similares** em **outras áreas da computação**:
    - Liberação de linhas de memória cache;
    - Liberação de entradas de cache de páginas em um servidor web.

Algoritmos de substituição de páginas

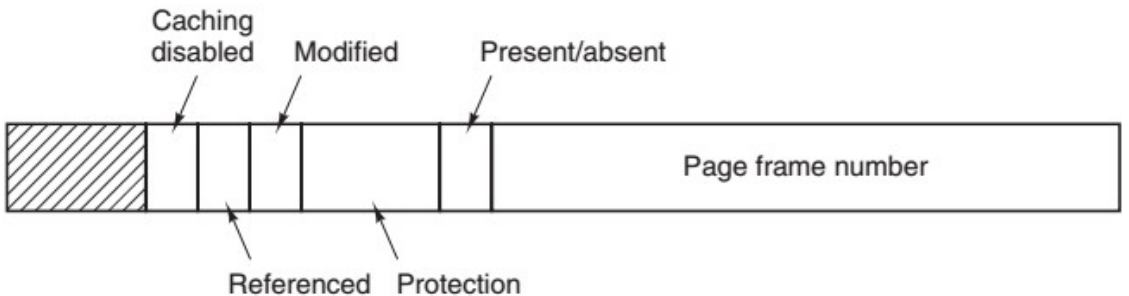
INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição ótimo**
  - O **algoritmo de substituição de página ótimo** estabelece que a **página** com o **maior rótulo** (representando o **número** de **instruções** que **serão executadas até que** a página seja **referenciada** em uma **instrução**) **deve** ser **removida**;
  - O único **problema** com esse **algoritmo** é que ele é **irrealizável**. No **momento** da **falta** da **página**, o **sistema operacional não tem como saber quando cada** uma das **páginas** será **referenciada** a **seguir**;
  - **Executando um programa em um simulador** e **mantendo** o **controle** de todas as **referências** de **página**, é possível **implementar** a **substituição** de **página ótima** na **segunda execução** usando as **informações** de **referência** de **página coletadas** durante a **primeira execução**;
  - É possível **comparar** o **desempenho** de **algoritmos realizáveis** com o caso ótimo.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição Não Recentemente Usado (NRU)**
  - A maioria dos computadores com **memória virtual** tem **dois bits** de **status**, **R** e **M**, **associados** a **cada página**;
  - O **bit R** é **ligado sempre** que a **página** é **referenciada** (lida ou escrita). O **bit M** é **ligado** quando a **página** é **modificada**. Os **bits estão contidos em cada entrada da tabela de páginas**:



  - **Esses bits devem ser atualizados em cada referência de memória**, portanto, é **essencial** que eles sejam **definidos** pelo **hardware**. Depois que um bit é definido como 1, ele permanece 1 até que o sistema operacional o redefina.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição Não Recentemente Usado (NRU)**
  - Quando um **processo** é **inicializado**, todas as **entradas** da **tabela** de **páginas** são **marcadas** como **não presentes** na memória;
  - Assim **quando qualquer página** for **referenciada**, ocorrerá uma **falta** de **página**;
  - O **sistema operacional liga** o **bit R** (em suas tabelas internas), **altera** a **entrada** da **tabela** de **páginas** para **apontar** para a **página correta**, com o **modo READ ONLY** e **reinicia** a **instrução**;
  - Se a **página** for **modificada depois**, **outra falta** de **página ocorrerá**, **permitindo** que o **sistema operacional ligue** o **bit M** e **altere** o **modo** da **página** para **READ/WRITE**;
  - Os **bits R e M** podem ser **usados** para **construir** um **algoritmo** de **paginação**.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição Não Recentemente Usado (NRU)**
  - Quando um **processo é inicializado**, os **dois bits de página de todas as suas páginas** são **definidos como 0** pelo sistema operacional;
  - **Periodicamente** (exemplo: em cada interrupção do relógio), o **bit R é limpo**, para **distinguir** as **páginas que não foram referenciadas recentemente** das que foram.
  - Em uma **falta de página**, o **sistema operacional inspeciona todas** as **páginas** e as **divide** em **quatro categorias** com **base** nos **valores atuais** de seus bits **R** e **M**:
    - **Classe 0**: não referenciada, não modificada.
    - **Classe 1**: não referenciada, modificada.
    - **Classe 2**: referenciada, não modificada.
    - **Classe 3**: referenciada, modificada
  - **Embora** as **páginas** da **classe 1 pareçam**, à primeira vista, **impossíveis**, **elas ocorrem quando** uma **página classe** 3 **tem** seu **bit R limpo** por uma **interrupção** do **relógio**.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA
MAUÁ

- **Algoritmo de substituição Não Recentemente Usado (NRU)**
  - **Algortitmo NRU remove aleatoriamente** uma **página** da **classe** de **número menor não vazia**;
  - **Implícito neste algoritmo** está a **ideia** de que é **melhor remover** uma **página modificada** que **não tenha sido referenciada** em **pelo menos** um **clock** (tipicamente cerca de 20 ms) **do que uma página limpa** que **esteja em uso constante**;
  - A principal **vantagem** do **NRU** é que ele é **fácil** de **entender**, **moderadamente eficiente** para **implementar** e oferece um **desempenho pode** ser **adequado**.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA
MAUÁ

- **Algoritmo de substituição First-In, First-Out (FIFO)**
  - A ideia é que o **sistema operacional mantenha** uma **lista** de **todas** as **páginas atualmente** na **memória**, com a **página** que **chegou mais recentemente na cauda** e a que chegou **menos recentemente na cabeça**;
  - Em uma **falta de página**, a **página** na **cabeça** é **removida** e a **nova página** é **adicionada** ao final da lista;
  - **Problema**: o **algoritmo FIFO** pode **remover** uma **página** mais **antiga** que **ainda** pode ser referenciada!
  - Por esta razão, o **FIFO** em sua **forma pura** é **raramente usado**.

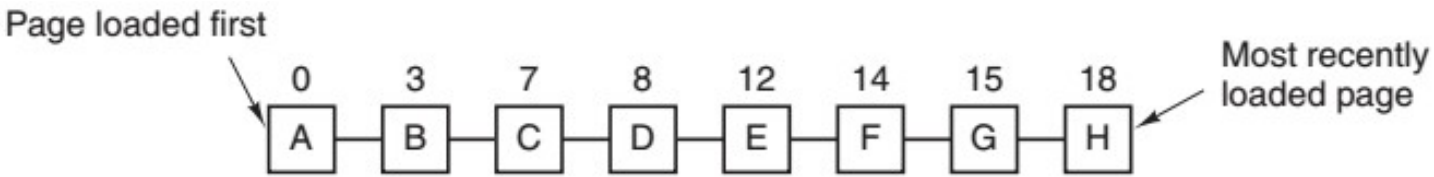
Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição Segunda Chance**
  - Uma **modificação simples** no **FIFO** que **evita** o **problema** de **descartar** uma **página muito usada** é **inspecionar** o **bit R** da **página mais antiga**;
  - **Se for 0**, a **página é antiga** e **não usada**, por isso é **substituída imediatamente**;
  - **Se o bit R for 1**, o **bit será limpo**, a **página** será **colocada** no **final** da **lista** de **páginas** e seu **tempo** de **carregamento** será **atualizado** como se **tivesse acabado** de **chegar** à **memória**.

Algoritmos de substituição de páginas

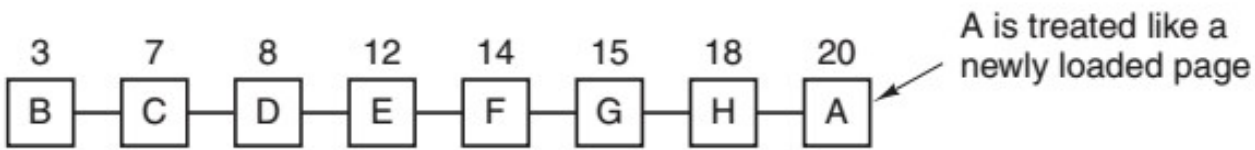
- **Algoritmo de substituição Segunda Chance**
  - **Exemplo**: as **páginas** A a H são **mantidas** em uma **lista ligada** e **ordenadas** pelo **tempo** que elas foram **chegaram** na memória:



Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição Segunda Chance**
  - Supor que uma **falta de página** ocorra no **momento 20**. A **página mais antiga** é **A**, que **chegou** no **tempo 0**, quando o **processo** foi **iniciado**. Se **A tiver o bit R limpo**, ele será **removido** da memória, e **gravado** no disco (**se** estiver **sujo**) ou **apenas abandonado** (se estiver **limpo**);
  - Por outro lado, se o **bit R estiver definido**, **A** será **colocado** no **final** da **lista** e seu "**tempo** de **carregamento**" será **redefinido** para o **tempo atual** (**20**). O **bit R também é apagado**. A **busca** por uma página adequada **continua** com **B**:



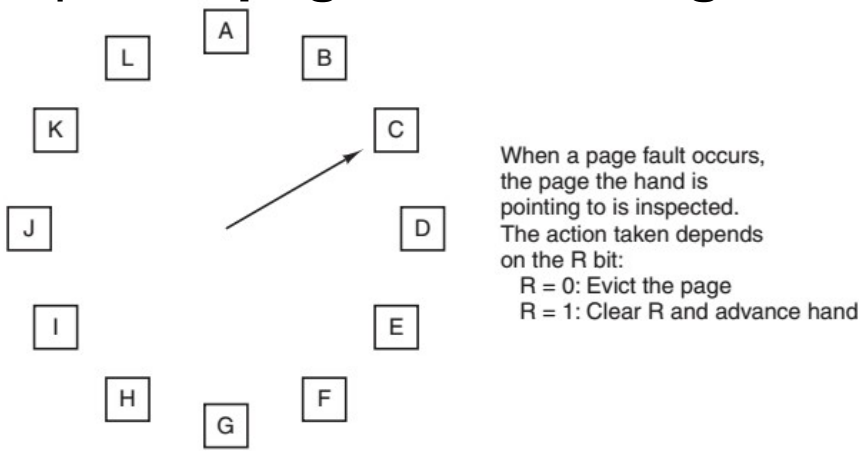
Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição Segunda Chance**
  - O que este algoritmo está **procurando** é uma **página antiga** que **não** tenha sido **referenciada** no **intervalo** de **clock** mais **recente**;
  - Se **todas** as **páginas** foram **referenciadas**, o **algoritmo** degenera em **FIFO puro**;
  - Se **todas** as **páginas** da **lista** tiverem seus bits **R** definidos o algoritmo moverá uma a uma as páginas para o final da lista, limpando o bit R cada vez que ele anexa uma página ao final da lista;
  - **Eventualmente**, ele **volta** para a **página A**, que agora tem seu bit R limpo. Neste ponto, **A** é **despejado**. Assim, o algoritmo sempre termina.

Algoritmos de substituição de páginas

- **Algoritmo de substituição do Relógio**
  - O algoritmo **Segunda Chance** é **razoável** mas é **desnecessariamente ineficiente** porque está **constantemente movendo páginas** em volta de sua **lista**;
  - Uma **abordagem melhor** é **manter** todos os **quadros** de **página** em uma **lista circular** (como em um **relógio**), onde o "ponteiro" **aponta** para a **página** mais **antiga**:



Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição do Relógio**
  - **Quando ocorre uma falta de página**, a **página** sendo **apontada** pela ponteiro é **inspecionada**;
  - **Se** o **bit R for 0**, a **página** é **removida**, a **nova** página é **inserida em seu lugar** e o **ponteiro** é **avançado uma posição**;
  - **Se R for 1**, ele **será zerado** e o **ponteiro avançará** para a **próxima página**;
  - Esse **processo** é **repetido até** que uma **página** seja **encontrada** com **R = 0**.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição Least Recently Used (LRU)**
  - As **páginas** que foram **muito usadas** nas **últimas instruções provavelmente serão muito usadas** novamente em **breve**;
  - Por outro lado, as **páginas** que **não** foram **usadas** por **muito tempo provavelmente permanecerão sem uso** por **muito tempo**;
  - **Princípio do algoritmo**: quando ocorrer uma **falta** de **página**, **despejar** a **página** que **não** foi **utilizada** há **mais tempo**. Essa **estratégia** é **chamada** de **LRU** (*Least Recently Used*).
  - Para a implementação, é necessário **manter** uma **lista ligada** de todas as páginas na **memória**, com a **página usada** mais **recentemente** na **frente** e a **menos utilizada recentemente** na **parte traseira**;
  - A **dificuldade** é que a **lista** deve ser **atualizada** em **todas** as **referências** de **memória**. Encontrar uma página na lista, excluí-la e, em seguida, movê-la para a frente é uma operação muito demorada, mesmo em hardware (supondo que tal hardware possa ser construído).

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA
MAUÁ

- **Algoritmo de substituição Least Recently Used (LRU)**
  - Uma forma de **implementar LRU conta** com **hardware especial**, um **contador** de **64 bits**, **C**, que é **automaticamente incrementado** após cada **instrução** ser **executada**;
  - Cada **entrada** da **tabela** de **páginas** também **deve** ter **um campo grande** o **suficiente** para **conter** o **valor** do **contador**;
  - **Após cada referência** de memória, o **valor** atual de **C** é **armazenado** na **entrada** da **tabela** de **páginas**, na **página** que **acabou** de **ser referenciada**;
  - Quando ocorre uma **falta** de **página**, o **sistema operacional examina** todos os **contadores** na **tabela** de **páginas** para encontrar o **menor**. **Essa página** é a **menos usada recentemente**.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA
MAUÁ

- **Algoritmo de substituição NFU**
  - Uma **alternativa** para **LRU** é chamada de **algoritmo NFU** (*Not Frequently Used*). **Requer** um **contador** de **software associado** a cada **página**, com valor inicial igual a zero;
  - A **cada interrupção** do **relógio**, o **sistema operacional verifica** todas as **páginas** na **memória**. Para **cada página**, o **bit R**, que é 0 ou 1, é **adicionado** ao **contador**. Os **contadores acompanham** a **frequência** com que cada **página** foi **referenciada**. Quando ocorre uma **falta** de **página**, a **página** com o **contador** mais **baixo** é **escolhida** para **substituição**.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

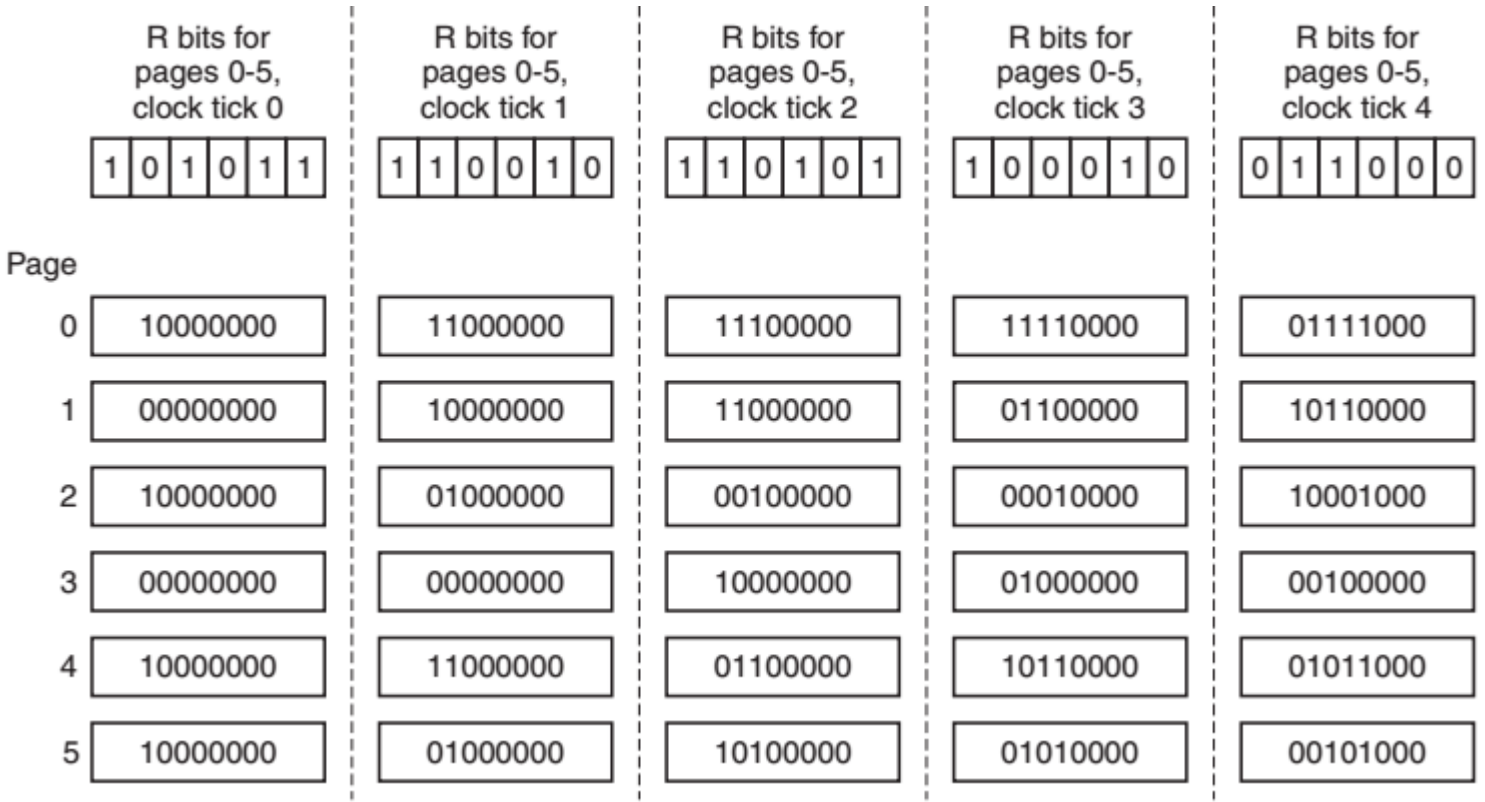
- **Algoritmo de substituição de Envelhecimento**
  - Uma **pequena modificação** no **NFU** permite **simular** a **LRU**;
  - A **modificação** tem **duas partes**. **Primeiro**, cada **contador** é **deslocado** para a **direita 1 bit antes** que o **bit R** seja **adicionado**. **Segundo**, o **bit R** é **adicionado** ao **bit mais à esquerda**, e não ao mais à direita.
  - Este algoritmo é conhecido como **envelhecimento** (*aging*).

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

MAUÁ

- **Algoritmo de substituição de Envelhecimento**



Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA
MAUÁ

- **Algoritmo de substituição de Envelhecimento**
  - Quando ocorre uma **falta** de **página**, a **página** cujo **contador** é o **menor** é **removida** (o número de zeros à esquerda indicam isso);
  - Esse algoritmo **difere** da **LRU** por que agora é **possível identificar claramente** qual é a **página menos utilizada**;
  - A segunda diferença é que no **algoritmo** de **envelhecimento** os **contadores** têm um **número finito** de **bits** (8 bits no exemplo do slide anterior) – isso **limita** seu **horizonte passado**.
  - No entanto, **8 bits geralmente é suficiente** se um ciclo de **clock** for em torno de 20 ms. Se uma página não foi referenciada em 160 ms, provavelmente não é tão importante.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA
MAUÁ

- **Algoritmo de substituição do Conjunto de Trabalho**
  - O **conjunto** de **páginas** que um **processo** está **usando atualmente** é seu **conjunto de trabalho** (*working set*);
  - **Se** todo o **conjunto** de trabalho **estiver** na **memória**, o **processo** é **executado** executado **sem causar muitas faltas** até que ele se mova para outra fase de execução;
  - **Se** a **memória disponível** for muito **pequena para** manter um **conjunto** de trabalho, o **processo causará muitas faltas** de página e será **executado lentamente**;
  - Um **problema ocorre** quando um **processo** é **lido** do **disco** após **comutação**: o **processo causará faltas** de **página** até que seu **conjunto** de **trabalho** seja **carregado** – **lentidão** – desperdiça tempo considerável da CPU.

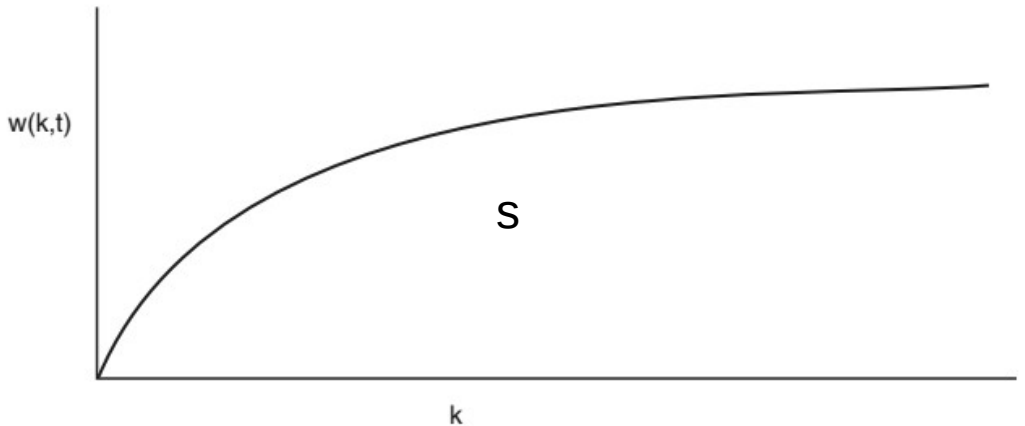
Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição do Conjunto de Trabalho**
  - **Modelo do Conjunto de Trabalho**: **método** para **acompanhar** o **conjunto** de **trabalho** de cada processo e **certificar** de que ele esteja na **memória antes** de **permitir** que o **processo** seja **executado** (**pré-paginação**);
  - Lembrar que o **conjunto de trabalho muda com o tempo –** em qualquer instante de **tempo *t***, existe um **conjunto** que **consiste** em todas as **páginas usadas** pelo ***k*-ésimo** referência à memória mais recente;
  - Este **conjunto**, ***w(k, t)***, é o **conjunto de trabalho**.

Algoritmos de substituição de páginas

- **Algoritmo de substituição do Conjunto de Trabalho**
  - O **conjunto** de **trabalho varia** muito **lentamente** para uma **faixa** de valores de ***k***:



  - Então, é possível **definir** um **conjunto** de **páginas** que podem ser **prontamente carregadas** quando um **processo** é **reinicializado** – **baseado** no **conjunto** de trabalho **quando** o **processo** foi **parado** pela última vez. Este **conjunto** é **carregado antes** do **processo executar**.

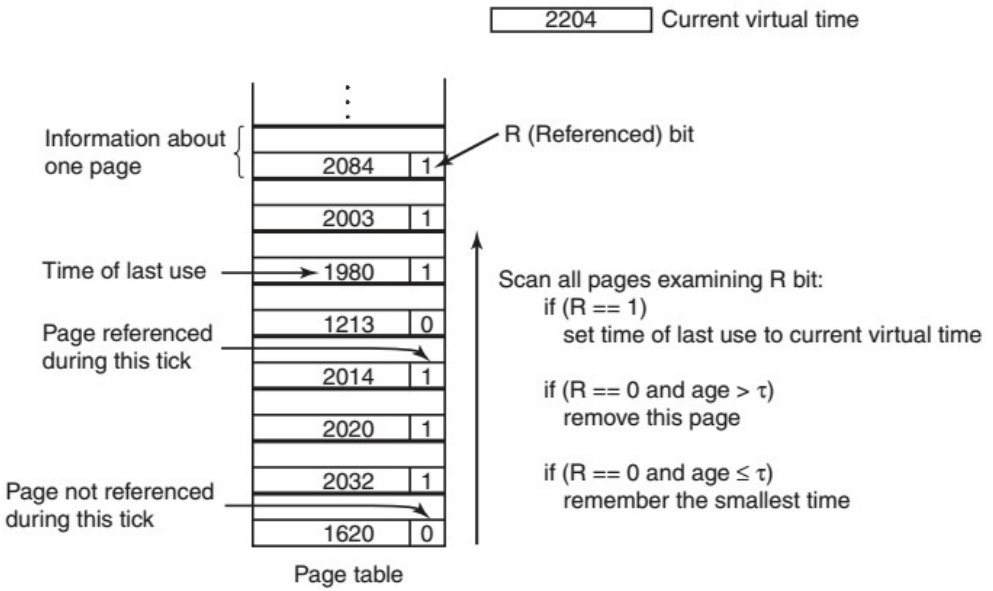
Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição do Conjunto de Trabalho**
  - A **implementação** de tal algoritmo poderia **levar** em **conta** o **conjunto** de **páginas utilizadas** nas **últimas *k* referências** de **memória** e utilizar um **registrador** que **armazenasse** os ***k* números** de **páginas –** mas esta solução não é prática;
  - Uma **solução prática** é utilizar o **tempo de execução realmente utilizado** (tempo virtual atual) no lugar de contar referências à memória – por **exemplo**, o **conjunto** de **páginas** utilizadas nos **últimos 100 ms**.

Algoritmos de substituição de páginas

- **Algoritmo de substituição do Conjunto de Trabalho**
  - A ideia básica é **encontrar** uma **página** que **não esteja** no **conjunto** de **trabalho** e **removê-la**. Como apenas as **páginas** localizadas na **memória** são consideradas **candidatas** à **remoção**, as páginas que estão **ausentes** da memória são **ignoradas**:



Itens principais de **informação**: o **tempo** (aproximado) em que a **página** foi **usada** pela última vez e o **bit R** (**Referenciado**). Um **retângulo branco vazio** simboliza os outros **campos não necessários** para esse algoritmo, como o **número** do **quadro** da **página**, os **bits** de **proteção** e o **bit M** (**Modificado**).

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição do Conjunto de Trabalho**
  - **Algoritmo**
    - Presume-se que o **hardware defina** os **bits R** e **M.** Presume-se que uma **interrupção periódica** do **relógio** cause a **execução** de um **software** que **limpe** o **bit referenciado** em cada **tick** do **relógio**;
    - **Em** cada **falha** de **página**, a **tabela** de **páginas** é **escaneada** para **procurar** uma **página adequada** para **remoção**. À **medida** que **cada entrada** é **processada**, o **bit R é examinado**.
    - **Se for 1**, o **tempo virtual atual** é **gravado** no **campo tempo** do **último uso na tabela** de páginas, **indicando** que a **página** estava em **uso** no **momento** em que a **falta ocorreu.** Assim, a **página** foi **referenciada** durante o **tempo atual** e **está** no **conjunto** de **trabalho** e **não** será **removida**.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição do Conjunto de Trabalho**
  - **Algoritmo**
    - **Se R for 0**, a **página não** foi **referenciada durante** o **tempo atual** e **pode ser** uma **candidata** para **remoção**. Para decidir isso, a sua **idade** (o **tempo virtual atual menos** o **tempo da última utilização**) é **calculada** e comparada com τ (intervalo parametrizado de tempo). **S**e a **idade** for **maior que** τ, a **página não estará** mais no **conjunto** de **trabalho** e a **nova página** a **substituirá**. A **varredura continua atualizando** as entradas **restantes**.

Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição do Conjunto de Trabalho**
  - **Algoritmo**
    - **No entanto**, se **R for 0** mas a **idade** for **menor ou igual** a τ, a **página** ainda **estará** no **conjunto** de **trabalho**. A página é **temporariamente poupada**, mas a **página** com a **maior idade** é **anotada**. **Se** a **tabela inteira** for **escaneada sem encontrar** um **candidato** para **remover**, e **uma** ou **mais páginas** com **R = 0** forem **encontradas**, a **página** com a **maior idade** será **removida**;
    - Na **pior** das **hipóteses**, **todas** as **páginas** foram **referenciadas** durante o **clock atual** (e, portanto, todas têm **R = 1**), portanto, **uma** é **escolhida aleatoriamente** para **remoção**, de **preferência** uma **página limpa**, se **existir**.

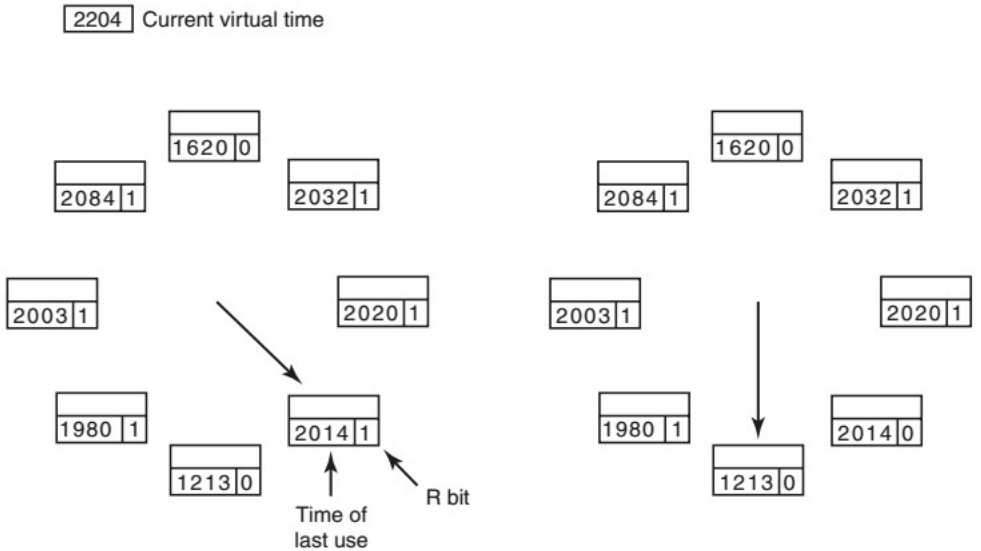
Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Algoritmo de substituição WSClock**
  - Trata-se de **outro algoritmo** que **utiliza** o **conjunto** de **páginas**, mas de uma forma mais **simples**;
  - Utiliza uma **estrutura** de **dados** tipo **lista circular** de **quadros** de **página**;
  - **Inicialmente**, esta **lista** está **vazia**. Quando a **primeira página** é **carregada**, ela é **adicionada** à **lista**.
  - À **medida** que **mais páginas** são **adicionadas**, elas **entram** na **lista** para **formar** um **anel**;
  - Cada **entrada contém** o **campo tempo do último uso** do algoritmo básico do **conjunto de trabalho**, bem como o **bit R** (mostrado) e o **bit M** (não mostrado).

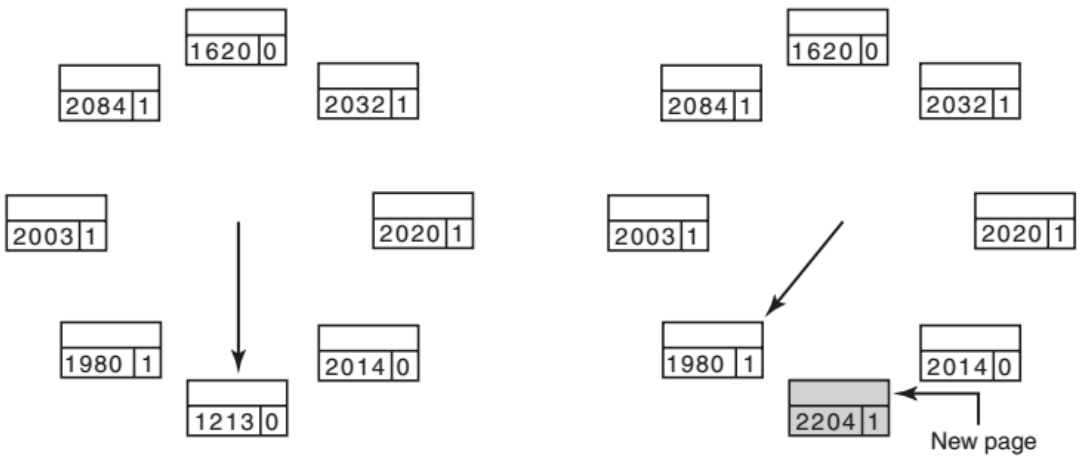
Algoritmos de substituição de páginas

- **Algoritmo de substituição WSClock**
  - Como no algoritmo do Relógio, a cada **falta** de **página**, a **página apontada pelo ponteiro** é **examinada primeiro**. Se o **bit R** for **1**, a **página foi usada durante** o **tick atual**, por isso **não** é um **candidato** ideal para **remover**. O **bit R** é então **ajustado** para **0**, o **ponteiro avança** para a **próxima página**, e o algoritmo é repetido para essa página:



Algoritmos de substituição de páginas

- **Algoritmo de substituição WSClock**
  - Se a **página apontada** tiver **R = 0**, e **se** a **idade** for **maior que τ e** a **página estiver limpa**, **ela não estará** no **conjunto** de trabalho e **existirá** uma **cópia válida** no disco. A **página** será **requisitada** a e a **nova página será armazenada ali**. **Se** a **página** estiver **suja**, ela **não poderá** ser **solicitada imediatamente**, pois **nenhuma cópia válida** está presente no **disco**. Assim o **ponteiro** é **avançado** e o **algoritmo continua** com a **próxima página**.



Algoritmos de substituição de páginas

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

- **Sumário**

Algorithm	Comment
Optimal	Not implementable, but useful as a benchmark
NRU (Not Recently Used)	Very crude approximation of LRU
FIFO (First-In, First-Out)	Might throw out important pages
Second chance	Big improvement over FIFO
Clock	Realistic
LRU (Least Recently Used)	Excellent, but difficult to implement exactly
NFU (Not Frequently Used)	Fairly crude approximation to LRU
Aging	Efficient algorithm that approximates LRU well
Working set	Somewhat expensive to implement
WSClock	Good efficient algorithm

Referências bibliográficas

TANENBAUM, Andrew S. **Sistemas operacionais modernos**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2013. 653 p.