

Análise Comparativa de Algoritmos de Substituição de Páginas: Desempenho e Aplicabilidade

João Augusto Carvalho Araújo¹ e João Pedro Monteiro²

¹Universidade de Fortaleza - Engenharia da Computação

²Universidade de Fortaleza - Ciências da Computação

Palavras-chave: Substituição de páginas. Gerenciamento de memória. Algoritmos de Substituição. Memória virtual. Desempenho de sistemas operacionais

Resumo

Este trabalho realiza uma análise comparativa dos principais algoritmos de substituição de páginas: FIFO (*First In, First Out*), LRU (*Least Recently Used*), Relógio (*Clock*) e NFU (*Not Frequently Used*). A substituição de páginas é uma técnica fundamental no gerenciamento de memória em sistemas operacionais, especialmente em ambientes de multitarefa com memória limitada. Para avaliar o desempenho de cada algoritmo, foram realizadas simulações utilizando diferentes sequências de referências a páginas e variados tamanhos de quadros de memória. Os resultados revelaram características específicas de cada algoritmo, como a suscetibilidade do FIFO à Anomalia de *Belady*, o desempenho inferior do LRU em cenários onde a frequência de uso é mais relevante que a "recência", a versatilidade do Relógio e as limitações do NFU em contextos dinâmicos. Conclui-se que a escolha do algoritmo ideal depende do padrão de acesso à memória previsto, sendo que uma abordagem híbrida pode ser vantajosa em ambientes de carga variável. Este estudo oferece *insights* valiosos para a otimização de sistemas operacionais, contribuindo para uma melhor gestão da memória em diferentes contextos de uso.

Introdução

Os algoritmos de substituição de páginas desempenham um papel fundamental no gerenciamento da memória em sistemas operacionais, especialmente em ambientes com memória virtual. A memória virtual permite que o sistema operacional simule mais memória do que fisicamente disponível, armazenando temporariamente dados que não estão sendo utilizados em áreas de armazenamento secundário, como discos rígidos (Norões, 2024). Para manter um desempenho eficiente, os sistemas devem decidir qual página da memória principal será substituída quando uma nova página precisar ser carregada.

Existem vários algoritmos projetados para realizar essa tarefa de forma eficaz. Cada um deles utiliza critérios distintos para determinar quais páginas devem ser removidas. O algoritmo FIFO é um dos mais simples e baseia-se na ordem de chegada das páginas, removendo sempre a mais antiga. Embora sua implementação seja simples, ele pode sofrer com o problema de "anomalia de Belady", onde o aumento no número de quadros de página pode resultar em um maior número de falhas de página, o que não é intuitivo.

O LRU oferece uma abordagem mais refinada, removendo a página que não foi usada por mais tempo, assumindo que páginas recentemente utilizadas têm maior probabilidade de serem acessadas novamente em breve. Este algoritmo, no entanto, pode ser caro em termos de implementação, já que o sistema precisa manter o controle preciso das páginas mais recentemente acessadas, através de uma lista duplamente encadeada com um hash map (Norões, 2024).

O algoritmo Relógio é uma melhoria em relação ao FIFO, combinando simplicidade e eficiência. Ele utiliza um ponteiro que percorre as páginas em um ciclo, marcando aquelas que foram acessadas recentemente

para evitar sua remoção prematura. A estrutura circular do Relógio evita a complexidade do LRU ao mesmo tempo em que tenta reduzir o número de falhas de página (Norões, 2024).

O NFU, por sua vez, baseia-se na frequência de acessos às páginas, acumulando contadores que indicam quais páginas são menos utilizadas ao longo do tempo. Embora ofereça uma estratégia interessante, pode não refletir adequadamente o comportamento de programas modernos, já que páginas usadas muito no início e nunca mais acessadas podem acabar sendo mantidas por mais tempo do que o necessário (Norões, 2024).

Ao longo das últimas décadas, a escolha de um algoritmo de substituição de páginas eficiente tem sido objeto de intensas pesquisas, e muitos sistemas modernos implementam variações ou combinações desses algoritmos para atender às necessidades específicas de suas cargas de trabalho. O estudo desses algoritmos, além de fornecer insights sobre a eficiência de sistemas operacionais, também destaca o equilíbrio necessário entre simplicidade de implementação e desempenho efetivo.

Metodologia

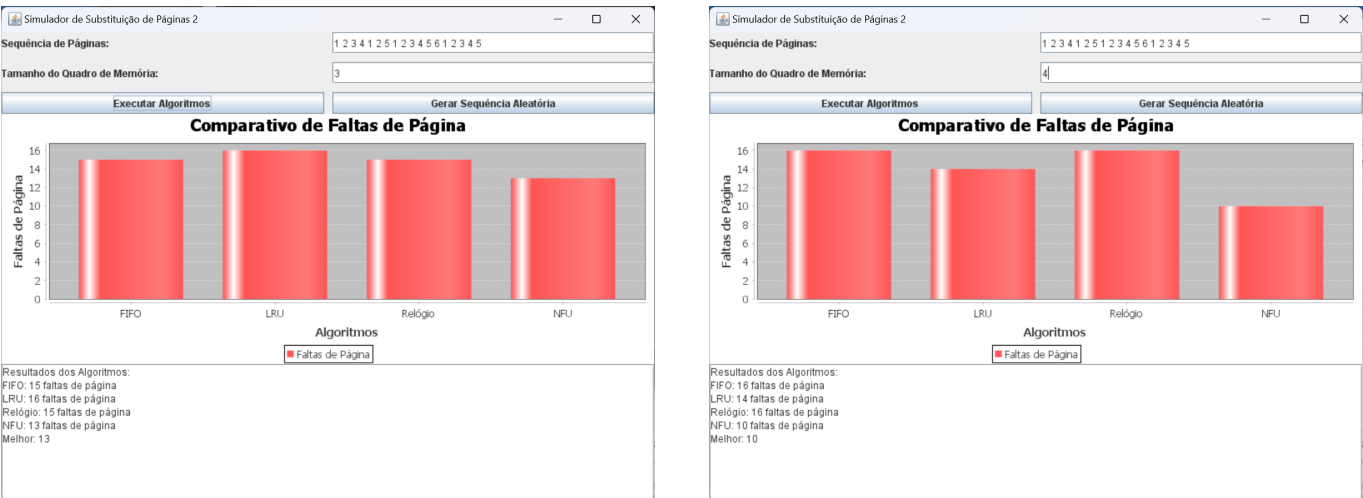
Este trabalho utiliza uma abordagem descritiva para analisar os principais algoritmos clássicos de substituição de páginas: FIFO, LRU, Relógio e NFU. A pesquisa é fundamentada em uma análise prática e documental, com foco em demonstrar o funcionamento, as vantagens e as limitações de cada algoritmo no contexto de gerenciamento de memória em sistemas operacionais.

Além da descrição técnica, são discutidos os impactos de cada algoritmo em termos de eficiência e desempenho em variados cenários de carga de trabalho, evidenciando fenômenos como a Anomalia de Belady. Dessa forma, o estudo busca fornecer uma visão abrangente sobre a aplicabilidade e os desafios de implementação dos algoritmos em ambientes com diferentes padrões de acesso à memória.

Resultados e Discussão

A avaliação dos algoritmos de substituição de páginas FIFO, LRU, Relógio e NFU foi realizada utilizando diferentes sequências de referências a páginas e variados tamanhos de quadros de memória. Esta análise teve como objetivo ilustrar o número de faltas de página de cada algoritmo sob condições específicas, evidenciando as vantagens e limitações inerentes a cada método. O estudo permitiu observar como cada algoritmo se comporta em diferentes cenários, destacando a importância da escolha do algoritmo de acordo com o padrão de acesso à memória esperado.

Figura 1: Anomalia de Belady em diferentes configurações de quadro de memória



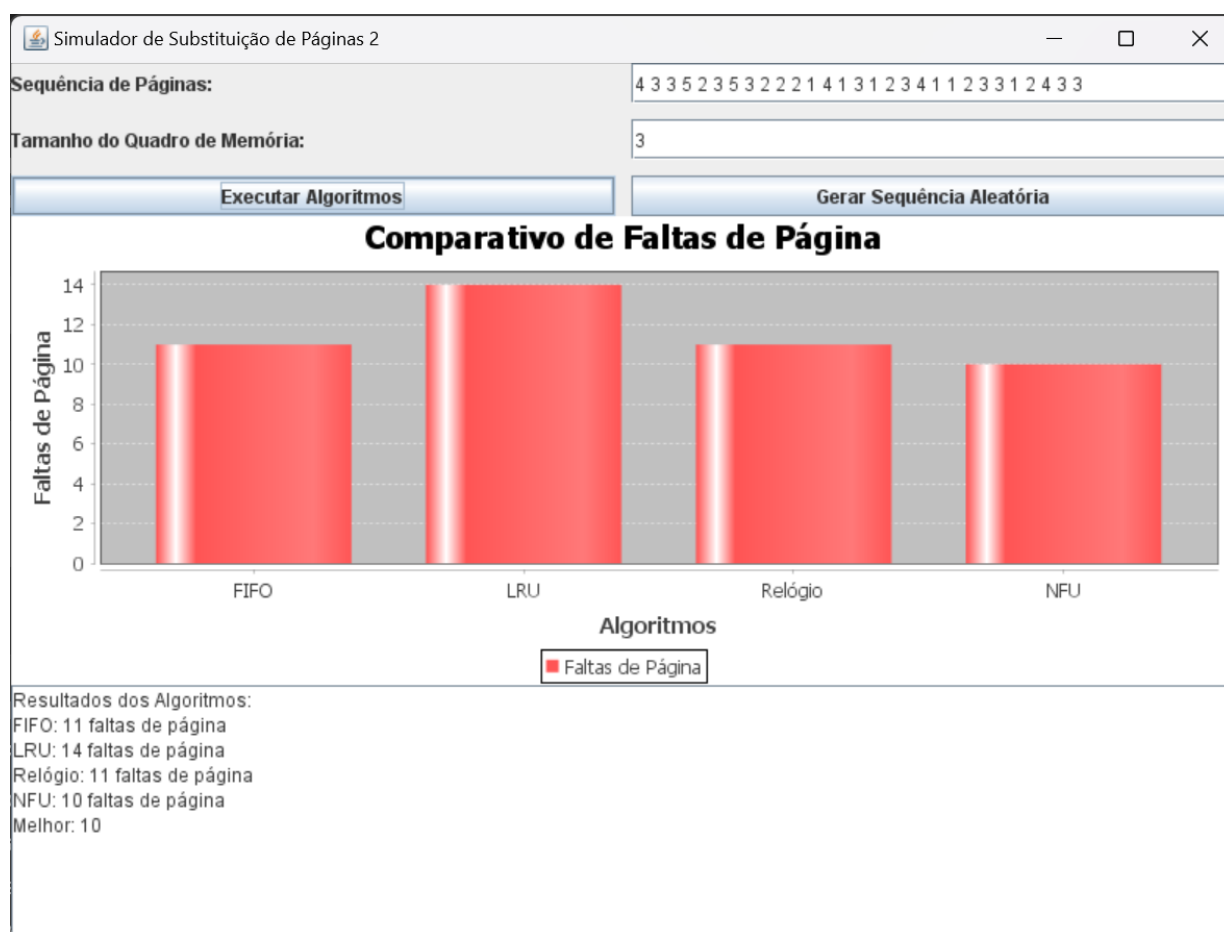
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Um fenômeno particularmente interessante observado nos testes foi a Anomalia de Belady, que ocorre

exclusivamente no algoritmo FIFO. Essa anomalia se manifesta quando o aumento do número de quadros de memória resulta em um aumento inesperado nas faltas de página, contrariando a expectativa de que mais quadros deveriam reduzir as faltas (Belady, 1966). A Figura 1 ilustra este fenômeno com duas configurações: (a) com três quadros de memória e (b) com quatro quadros de memória. Em ambos os casos, o FIFO sofre um aumento nas faltas de página quando a quantidade de quadros passa de três para quatro, o que exemplifica bem as limitações deste algoritmo. Este comportamento destaca que, em situações onde a Anomalia de Belady é provável, o FIFO pode não ser a melhor escolha.

Na Figura 2, observamos um cenário onde o algoritmo LRU apresenta desempenho inferior aos demais. Esse resultado ocorre em uma situação onde certas páginas são acessadas com frequência elevada, porém em intervalos temporais maiores. Embora o LRU seja eficaz em muitos contextos por manter as páginas recentemente utilizadas, ele pode falhar em padrões onde a recência não é um bom indicativo de relevância. Neste caso específico, o LRU remove páginas que, apesar de não serem as mais recentes, são frequentemente acessadas, resultando em um maior número de faltas de página.

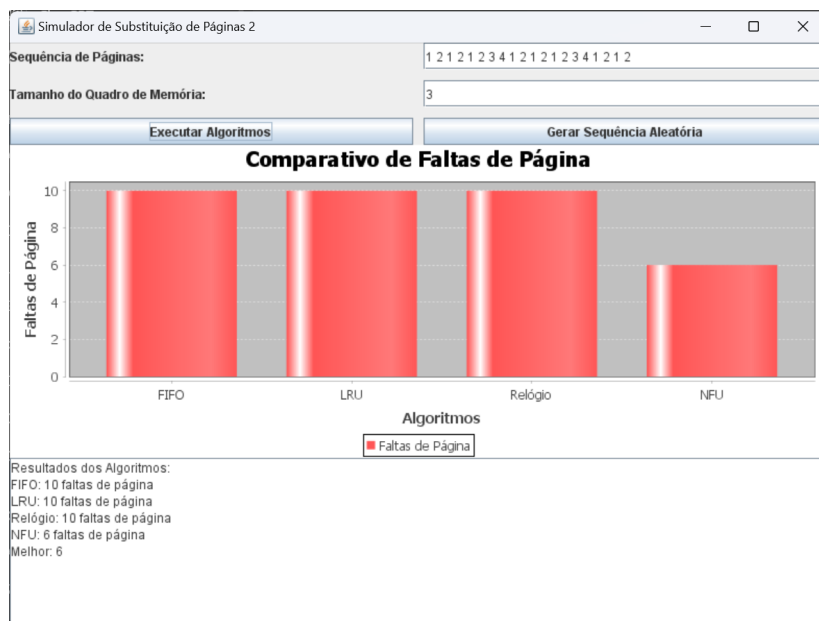
Figura 2: Desempenho inferior do LRU em comparação aos demais algoritmos



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A Figura 3 mostra um caso em que o algoritmo NFU supera o LRU e o Relógio. Este cenário foi projetado com uma sequência de referências onde algumas páginas são acessadas com maior frequência, independentemente de sua recência. O NFU, que prioriza a frequência de acessos ao invés da recência, consegue manter essas páginas na memória de forma mais eficaz do que os outros algoritmos. Esse comportamento sugere que, em ambientes onde o padrão de acesso é dominado por uma alta frequência de uso em vez da recência, o NFU pode ser uma opção vantajosa.

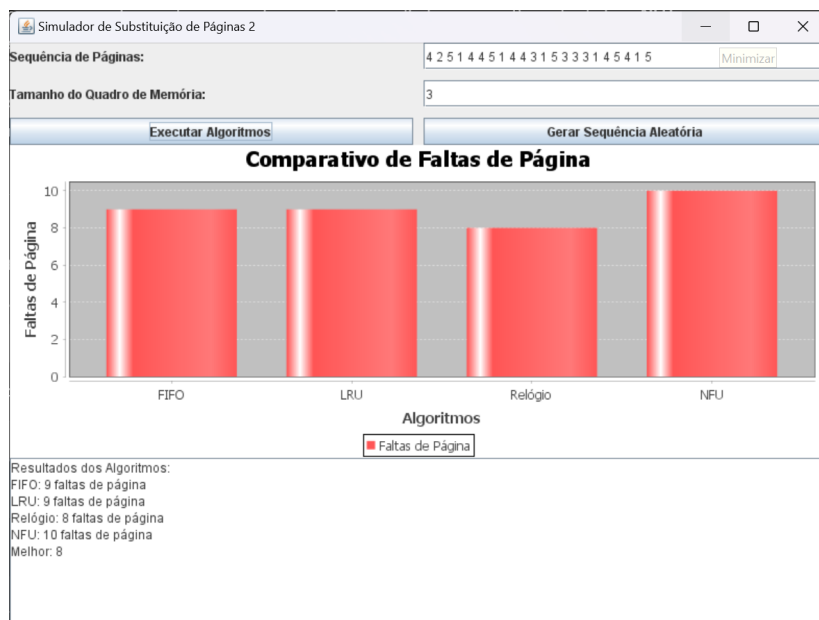
Figura 3: NFU superando LRU e Relógio em cenários com alta frequência de acessos



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Em contraste, a Figura 4 ilustra um caso onde o algoritmo Relógio alcança o melhor desempenho. Este algoritmo combina simplicidade e eficiência ao utilizar um ponteiro circular que dá "segunda chance" às páginas que foram recentemente acessadas. Neste cenário, o Relógio mantém de maneira eficaz as páginas mais relevantes na memória, minimizando o número de faltas de página. Esse resultado evidencia a versatilidade do Relógio, que adapta-se bem a diferentes padrões de uso ao fornecer uma solução equilibrada entre simplicidade e eficiência.

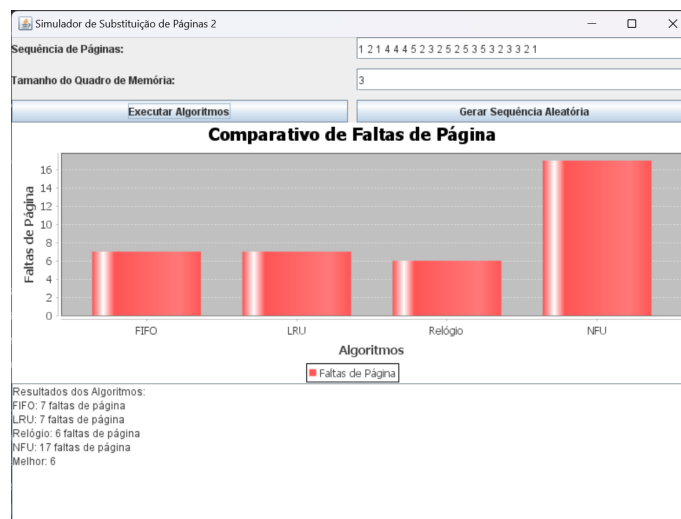
Figura 4: Desempenho superior do algoritmo Relógio em comparação aos demais



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Por fim, a Figura 5 mostra o desempenho inferior do NFU em um contexto onde o padrão de acesso muda dinamicamente. Neste caso, o NFU falha ao manter na memória páginas que foram muito acessadas no passado, mas que deixaram de ser relevantes. Como o NFU não considera o tempo desde o último acesso, ele mantém páginas que não são mais úteis, resultando em um número elevado de faltas de página. Este cenário destaca uma limitação significativa do NFU, que pode não ser a melhor escolha em ambientes onde a recência de acesso é um fator determinante para a relevância das páginas.

Figura 5: Desempenho inferior do NFU em comparação aos demais algoritmos



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Estes resultados demonstram que a escolha do algoritmo de substituição de páginas deve considerar o padrão específico de acesso à memória previsto no sistema. O FIFO, apesar de ser um algoritmo simples, pode sofrer com a Anomalia de Belady, enquanto o LRU é eficaz em contextos onde a recência é um bom indicador de relevância. O Relógio representa uma opção equilibrada e adaptável, sendo eficaz em diversos cenários. O NFU se destaca em ambientes onde a frequência de uso é o fator predominante, mas pode ser ineficaz em padrões dinâmicos de acesso. Desta forma, a análise de cada algoritmo revela suas potencialidades e limitações, indicando que a escolha adequada depende das características específicas da carga de trabalho do sistema.

Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise comparativa dos algoritmos de substituição de páginas FIFO, LRU, Relógio e NFU, evidenciando seus pontos fortes e fracos em diferentes cenários de acesso à memória. A avaliação incluiu a análise de fenômenos específicos, como a Anomalia de Belady, que demonstrou as limitações do FIFO, e os cenários em que o LRU, o Relógio e o NFU apresentaram desempenhos variados dependendo da frequência e recência dos acessos às páginas.

Os resultados obtidos mostram que não existe um algoritmo universalmente superior; cada um possui características que o tornam mais adequado para determinados padrões de acesso. O FIFO, embora seja de implementação simples, pode ser desvantajoso em sistemas suscetíveis à Anomalia de Belady. O LRU, por outro lado, é ideal para ambientes onde a recência de uso é um bom indicador de necessidade futura, mas pode falhar em cenários onde a frequência é mais relevante. O Relógio oferece um bom equilíbrio entre eficiência e simplicidade, sendo versátil e capaz de adaptar-se a uma ampla gama de padrões de uso. O NFU, ao priorizar a frequência de acessos, é eficaz em cenários onde algumas páginas são acessadas repetidamente, mas perde desempenho em contextos dinâmicos, onde a recência é mais importante.

Com base nas observações, conclui-se que a escolha do algoritmo de substituição de páginas deve ser feita considerando as características específicas da carga de trabalho do sistema. Em ambientes onde a carga de trabalho varia frequentemente, uma abordagem híbrida, que combina características de diferentes algoritmos, pode ser uma solução interessante. Este estudo contribui para uma compreensão mais aprofundada dos algoritmos de gerenciamento de memória, auxiliando na escolha e implementação do método mais adequado para otimizar o desempenho de sistemas operacionais.

Anéxos:

Repositório do projeto: <https://github.com/joaoaugustocz/pageReplacementSimulator>

Referências

BELADY, L. A. A study of replacement algorithms for a virtual-storage computer. *IBM Systems journal*, IBM, v. 5, n. 2, p. 78–101, 1966.

NORões, I. *UNIDADE III - Gerenciamento de memória e sistemas de arquivos*. 2024. Disponível em: <https://ead.unifor.br/ava/pluginfile.php/3959602/mod/_resource/content/1/Aula\%2012\%20-\%20Proj\%20Sistema\%20Operacional.pdf>.