

Relatório do Trabalho 2 - Memória Virtual Paginada Sob Demanda

- Davi Ludvig,
- João Paulo Oliveira e
- Gibram Goulart.

Introdução

Este documento reúne um apanhado de informações acerca da solução dos discentes autores para resolver o enunciado do trabalho 2 da disciplina INE5412.

1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é implementar um sistema de memória virtual paginada sob demanda em espaço de usuário, compreendendo a mecânica do tratamento de faltas de página e avaliando o desempenho de diferentes algoritmos de substituição de páginas (FIFO, RANDOM e um algoritmo personalizado). A implementação foi baseada no projeto do Prof. Douglas Thain (Universidade de Notre Dame), adaptado para o ambiente proposto em aula e disponibilizado pelo professor Giovani Gracioli.

2. Ambiente Experimental

- **Máquina utilizada:**

- Sistema Operacional: Ubuntu 24.04 LTS
- Compilador: g++ (Ubuntu 13.3.0-6ubuntu2~24.04) 13.3.0
- Make: GNU Make 4.3 compilado para x86_64-pc-linux-gnu

- **Execução dos testes:**

Para cada programa (**alpha**, **beta**, **gamma**, **delta**), os seguintes comandos podem ser executados com variações:

```
./virtmem 10 10 rand alpha
./virtmem 10 10 fifo beta
./virtmem 10 10 custom gamma
...
```

3 Arquitetura

3.1 Estrutura Basica

O projeto foi dividido nas seguintes classes:

- **Page_Table**: Interface com a tabela de páginas.
- **Disk**: Simulação de um disco secundário.

- **Page_Replacement**: Gerencia o estado dos frames físicos (livres/ocupados) e realiza as substituições de páginas.
- **Program**: Classe responsável por gerenciar os programas utilizados nas execuções (**alpha**, **beta**, **gamma** e **delta**). Ela coordena o fluxo das instruções, realiza acessos à memória virtual e simula os diferentes padrões de uso de memória definidos para os testes.

3.2 Como executar o sistema

Foi construído um arquivo **Makefile** para facilitar a compilação e execução do sistema. Para compilar o sistema, basta executar o comando na raiz do projeto (onde está localizado o arquivo **Makefile**):

```
make
```

Depois disso, o executável **virtmem** estará disponível na raiz do projeto. Para executar o sistema, utilize o seguinte comando:

```
./virtmem <número de frames> <número de páginas> <algoritmo de substituição> <programa>
```

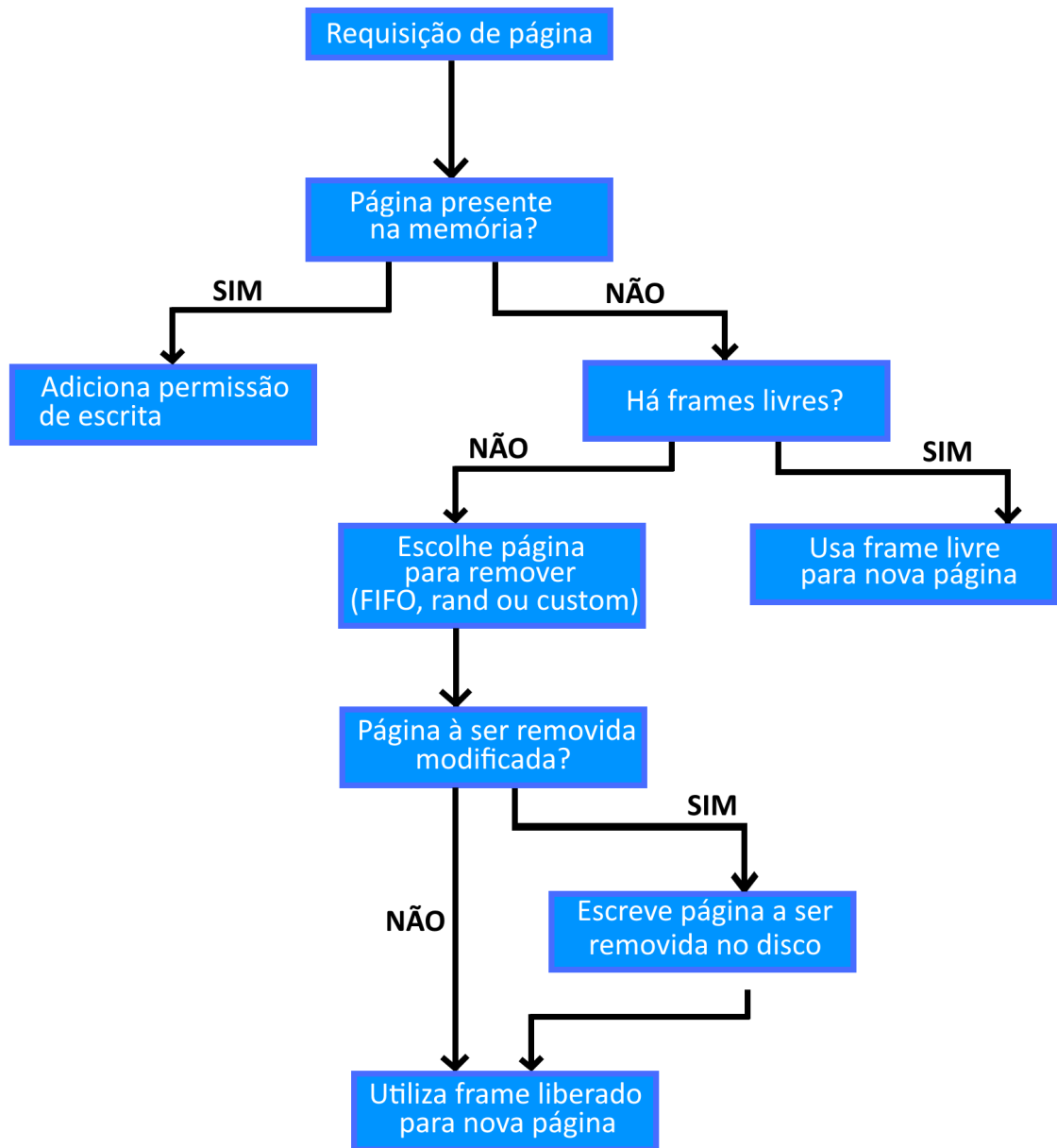
Todos os objetos **.o** estão localizados na pasta **build**, e o executável **virtmem** está localizado na raiz do projeto.

3.3 Funcionamento do Tratador de Page Faults:

Passos:

1. Detecta a falta de página.
2. Se for a primeira falta, inicializa os frames.
3. Verifica por um frame livre:
 - Se disponível, lê a página do disco.
 - Se não, aplica o algoritmo de substituição:
 - Se a página vítima foi modificada, escreve-a no disco.
 - Libera o frame e invalida a entrada anterior.
4. Carrega a nova página no frame.
5. Atualiza a entrada na tabela de páginas.
6. Caso seja FIFO, adiciona à fila.
7. Se já estiver na memória mas com permissão insuficiente, ativa o bit de escrita.

Estatísticas de execução (page faults, disk reads/writes) são coletadas automaticamente.



PROF

3.4 Diagrama de Classes

4. Algoritmos de Substituição de Página

4.1. RANDOM

Seleciona aleatoriamente uma página para substituição.

4.2. FIFO (First-In, First-Out)

Mantém uma fila das páginas carregadas. A página mais antiga (a que entrou primeiro) é removida.

4.3 CUSTOM

- Como algoritmo personalizado **custom** construído pelo grupo, foi decidido implementar uma versão do algoritmo de substituição de páginas **LRU (Least Recently Used)**.

- Na inicialização da classe `Page_Replacement`, são definidos dois atributos:
 1. O vetor de inteiros `tempo_acesso`, que armazena o tempo do último acesso de cada frame.
 2. O inteiro `tempo_atual`, que é incrementado a cada vez que uma página é acessada, servindo como um contador de tempo global.
- Dentro do método `Page_Replacement::select_frame_to_be_removed`, é feita a checagem do algoritmo. Se for custom, aplica os seguintes passos:
 1. Define o tempo mínimo como o maior inteiro possível.
 2. Define o frame a ser removido como -1. (Nenhum frame)
 3. Para cada frame, faça
 1. Se o tempo de acesso do frame for menor que o tempo mínimo, defina que o frame a ser removido é o atual.
 4. Retorne o frame a ser removido.

4.3.1 Comparações

Rand

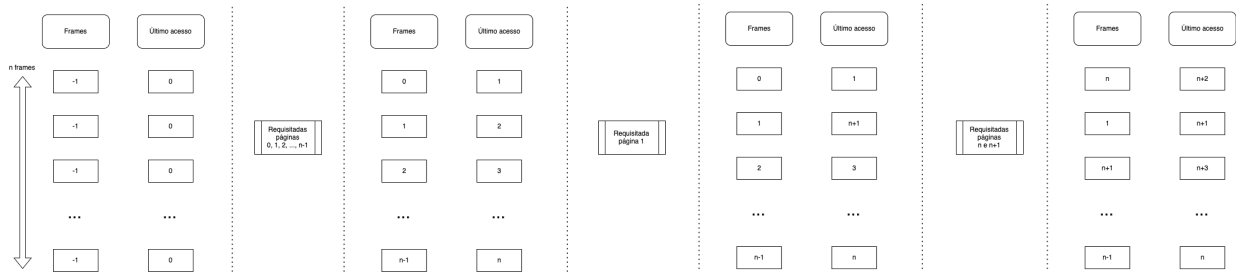
- O algoritmo `rand` seleciona um frame aleatoriamente para remoção, o que pode levar a uma alta taxa de faltas de página, especialmente em cenários onde as páginas acessadas recentemente são necessárias novamente.
- Nesse cenário, existirão diversas possibilidades do `custom` se sair melhor que o `rand`, pois o `custom` prioriza a remoção de páginas que não foram acessadas recentemente, enquanto o `rand` não considera o histórico de acesso.

FIFO

- O algoritmo `fifo` remove a página que foi carregada há mais tempo, o que pode levar a uma taxa de faltas de página alta se as páginas acessadas recentemente forem removidas.
- O `custom` pode se sair melhor que o `fifo` em cenários onde as páginas acessadas recentemente são necessárias novamente, pois o `custom` prioriza a remoção de páginas que não foram acessadas recentemente.
- Além disso, em cenários onde há uma alta taxa de acesso a páginas, o `custom` pode se sair melhor que o `fifo`, pois o `fifo` não considera o histórico de acesso das páginas, enquanto o `custom` prioriza a remoção de páginas que não foram acessadas recentemente. Isso pode ser perceptível também em cenários com bastante leitura.

Gráfico para entendimento

- Foi construído o seguinte diagrama gráfico para melhor entendimento do algoritmo **custom**:



Primeiro, alocou-se ambos vetores que representam o **frame** e o **tempo_acesso** para cada frame (**n**). O vetor de frames inicia com todos os valores iguais a -1, indicando que nenhum frame está ocupado. O vetor de **tempo_acesso** inicia com todos os valores iguais a 0, indicando que nenhum frame foi acessado.

Em seguida, são requisitadas as páginas **0, 1, 2, ..., n-1**, que ocupam todos os frames disponíveis. A cada requisição, o tempo atual é incrementado e o tempo de acesso do frame correspondente é atualizado para o valor do tempo atual.

Após isso, a página **1** é requisitada novamente, o que atualiza o tempo de acesso do frame correspondente para o valor do tempo atual (**n+1**).

Depois da requisição da página **1**, as páginas **n** e **n+1** são requisitadas. Como não há frames disponíveis, o algoritmo **custom** seleciona o frame com o menor tempo de acesso, que é o frame da página **0**, e o substitui pela página **n**. E o frame que alocava a página **2** é substituído pela página **n+1**, pois o tempo de acesso do frame da página **2** é o menor dentre os disponíveis no momento.

Com isso, observamos que o algoritmo **custom** (LRU) remove sempre a página que está há mais tempo sem ser acessada, o que pode levar a uma taxa de faltas de página menor em cenários onde as páginas acessadas recentemente são necessárias novamente.

É perceptível que, neste caso, o algoritmo **custom** se sai melhor que o **rand** e o **fifo**, pois ele prioriza a remoção de páginas que não foram acessadas recentemente. Se fosse o caso de utilizar **fifo**, no tempo **n+3**, a página **1** seria removida, o que não é o ideal, pois ela foi acessada recentemente. Já o **rand** poderia remover qualquer página, sem considerar o histórico de acesso.

5. Resultados e Análises

A seguir, serão listados, para cada programa (**alpha**, **beta**, **gamma** e **delta**), uma sequência de gráficos que mostram os valores de **page faults**, **disk reads** e **disk writes** para cada algoritmo de substituição de página (**rand**, **fifo** e **custom**).

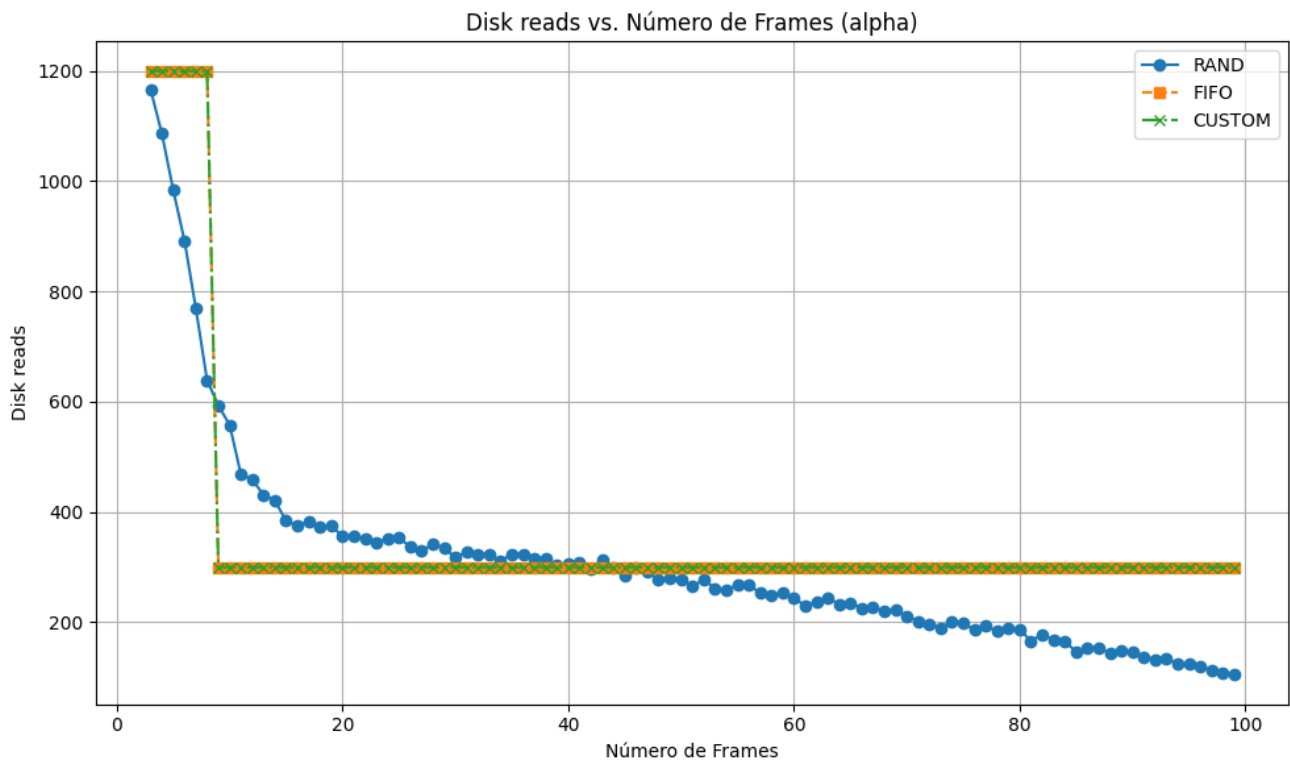
Cabe destacar que todos os testes de aleatoriedade foram executados com a semente de aleatoriedade **srand(0)**, para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Resultados dos testes

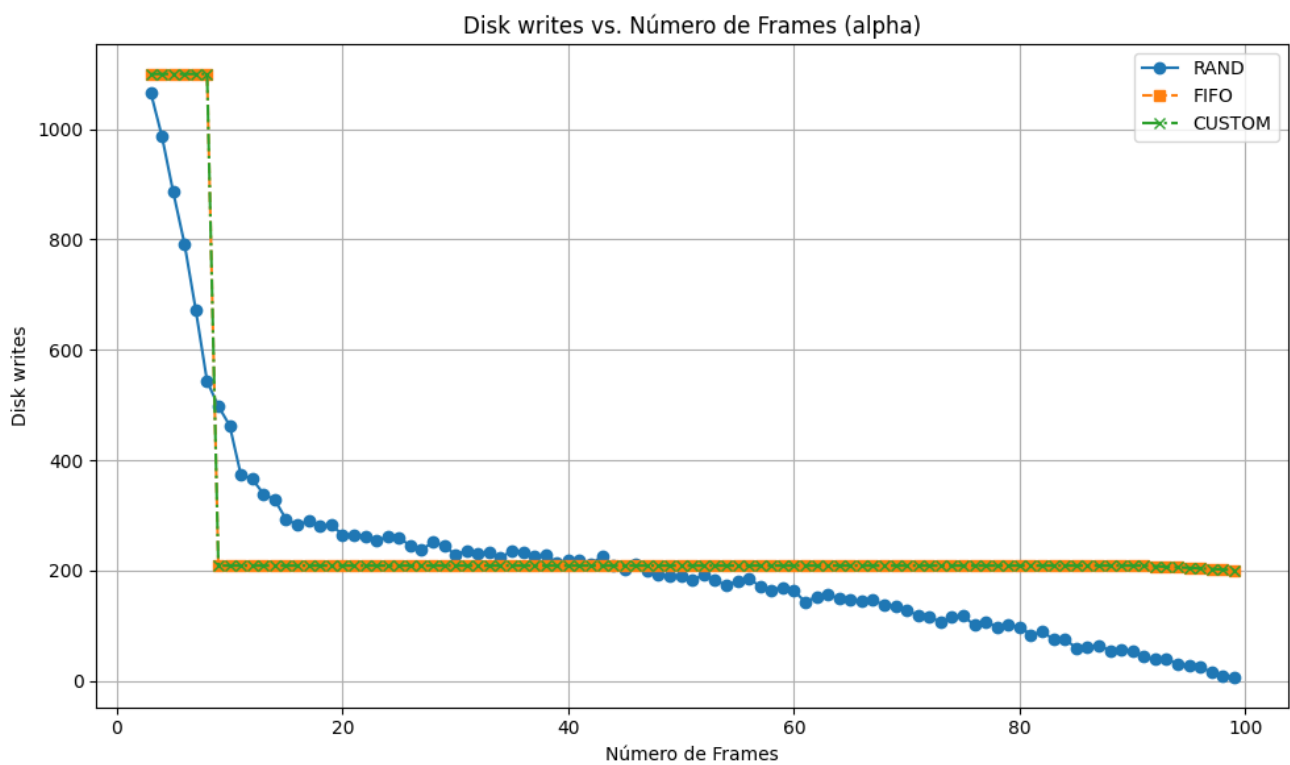
5.1 Alpha

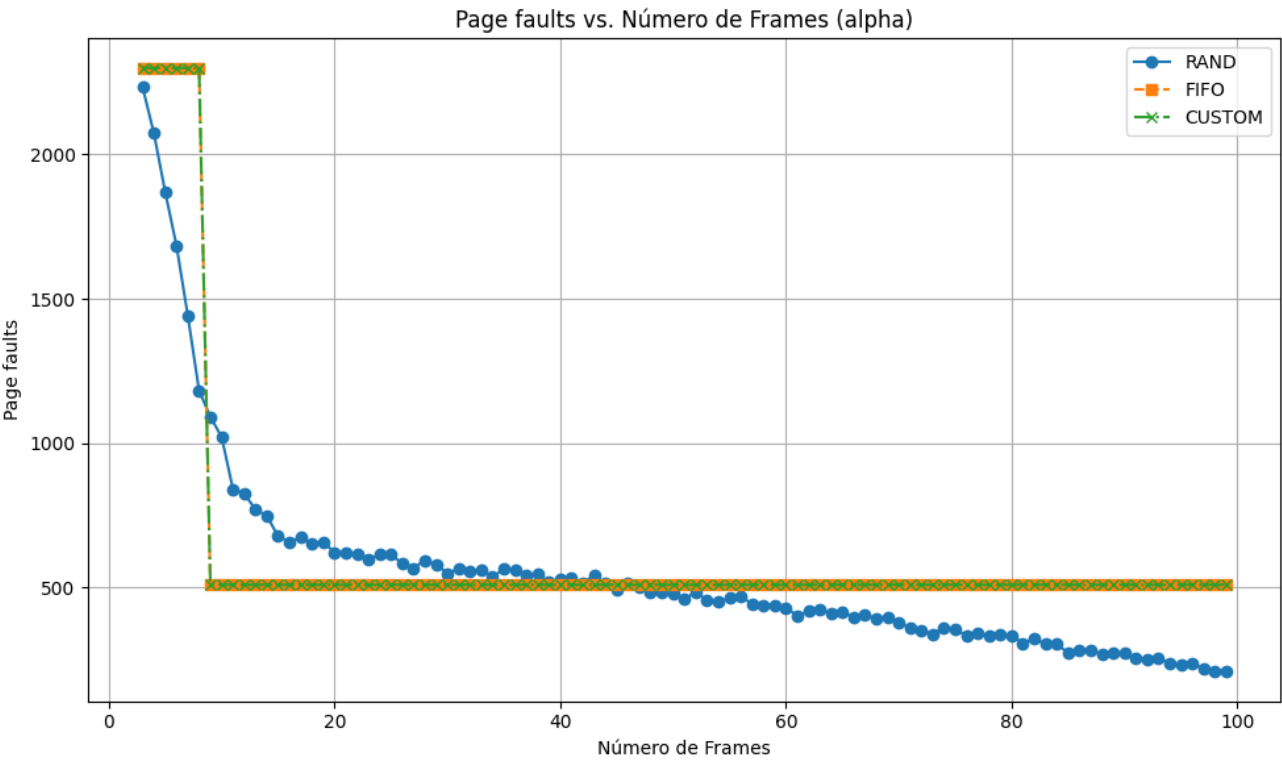
- O comportamento de **alpha** é caracterizado por acessos sequenciais a páginas, o que causa muitas faltas de página, especialmente quando o número de frames é baixo.
- Esse comportamento pode ser visto nos seguintes gráficos:

Leituras de disco



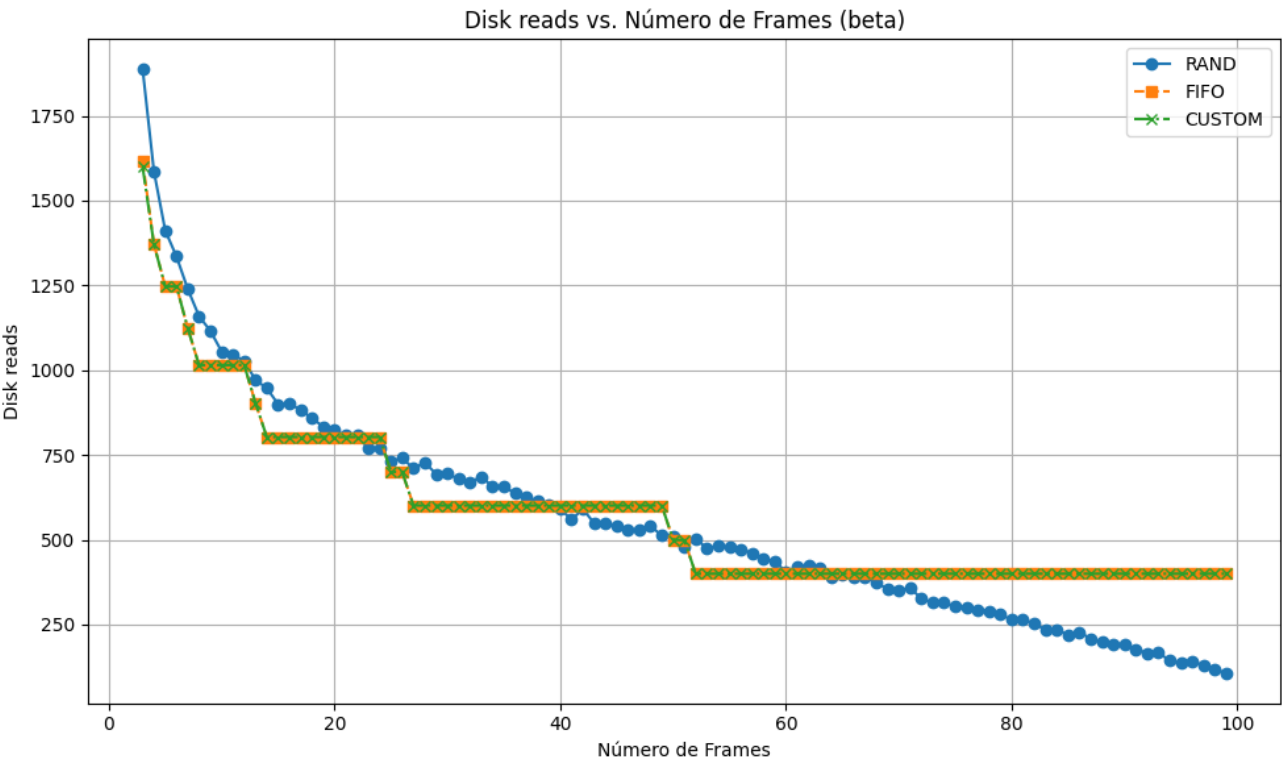
Escritas de disco



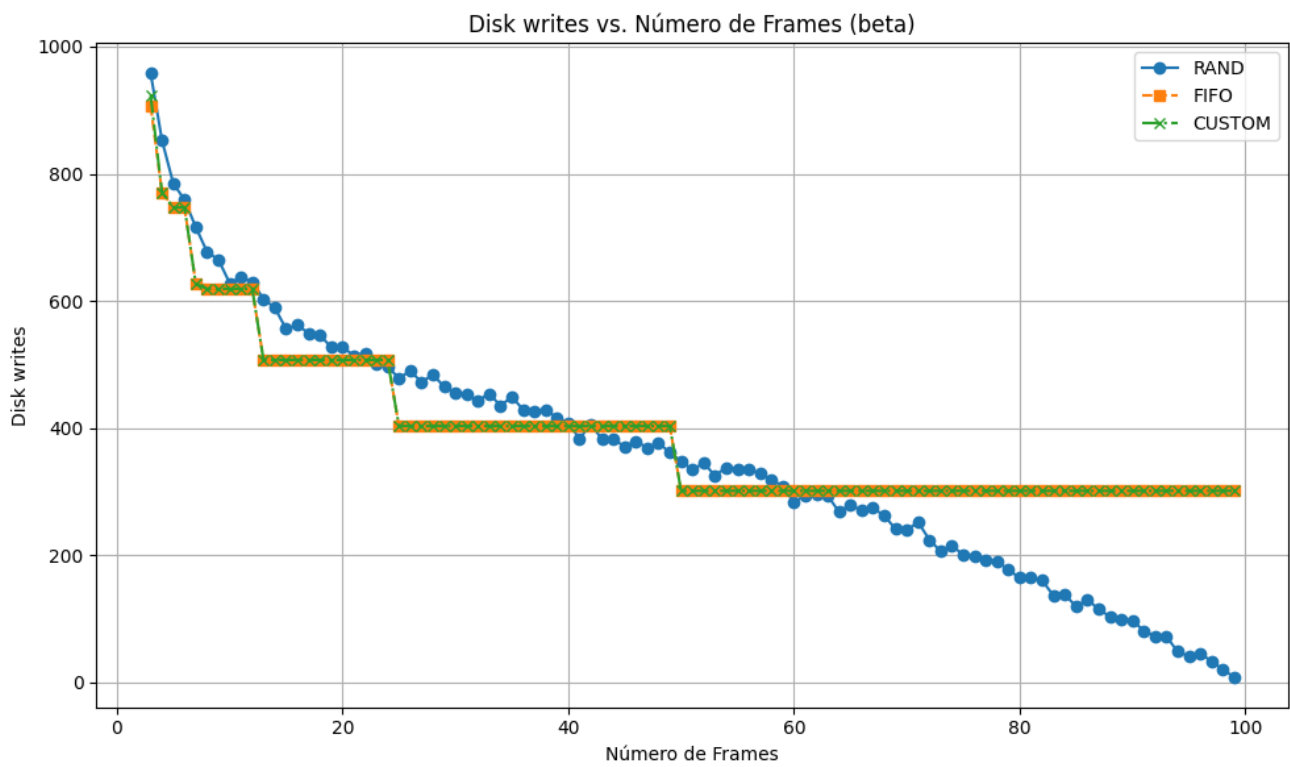


5.2 Beta

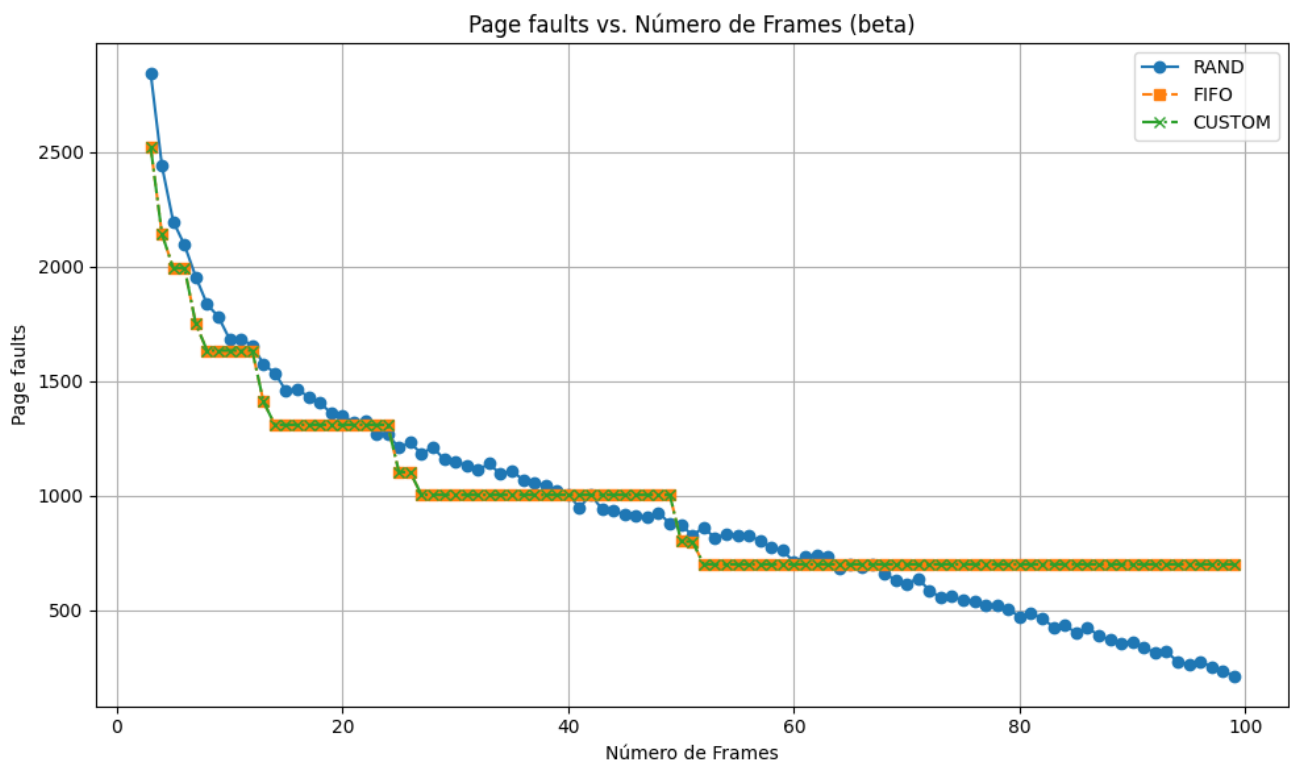
Leituras de disco



Escritas de disco



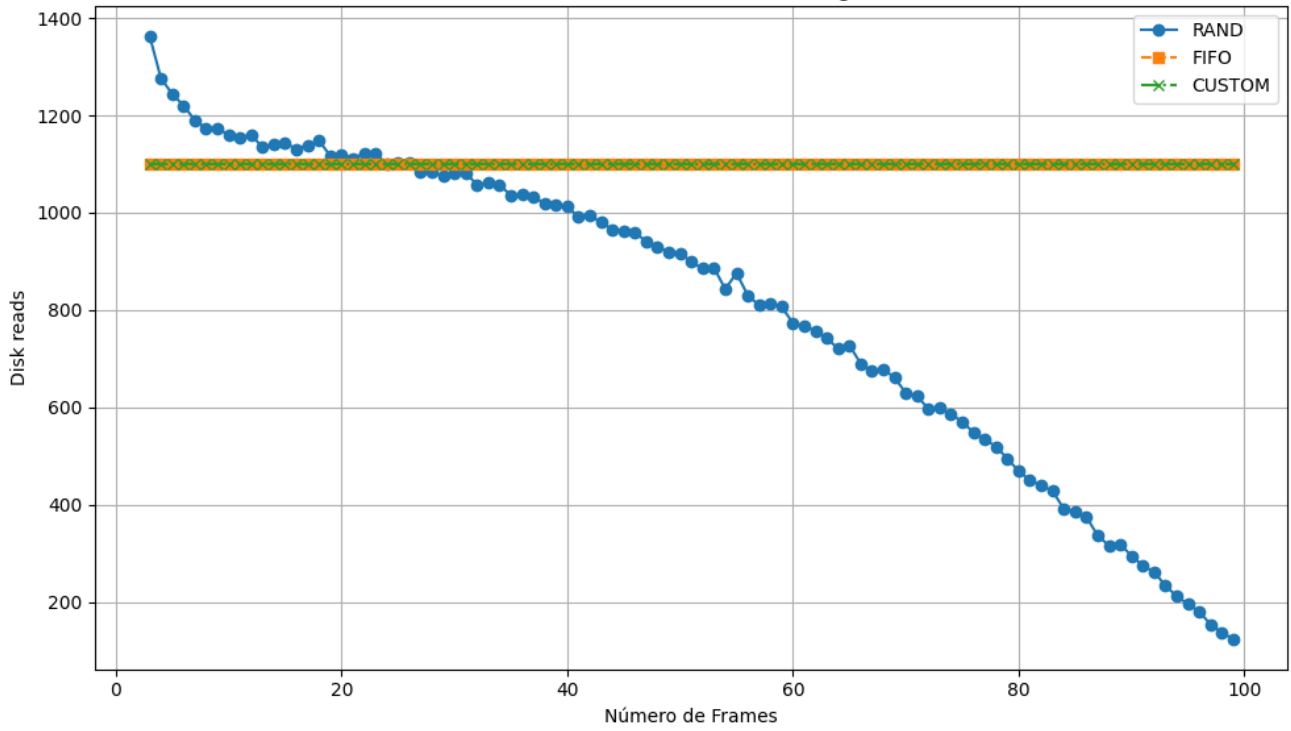
Faltas de página



5.3 Gamma

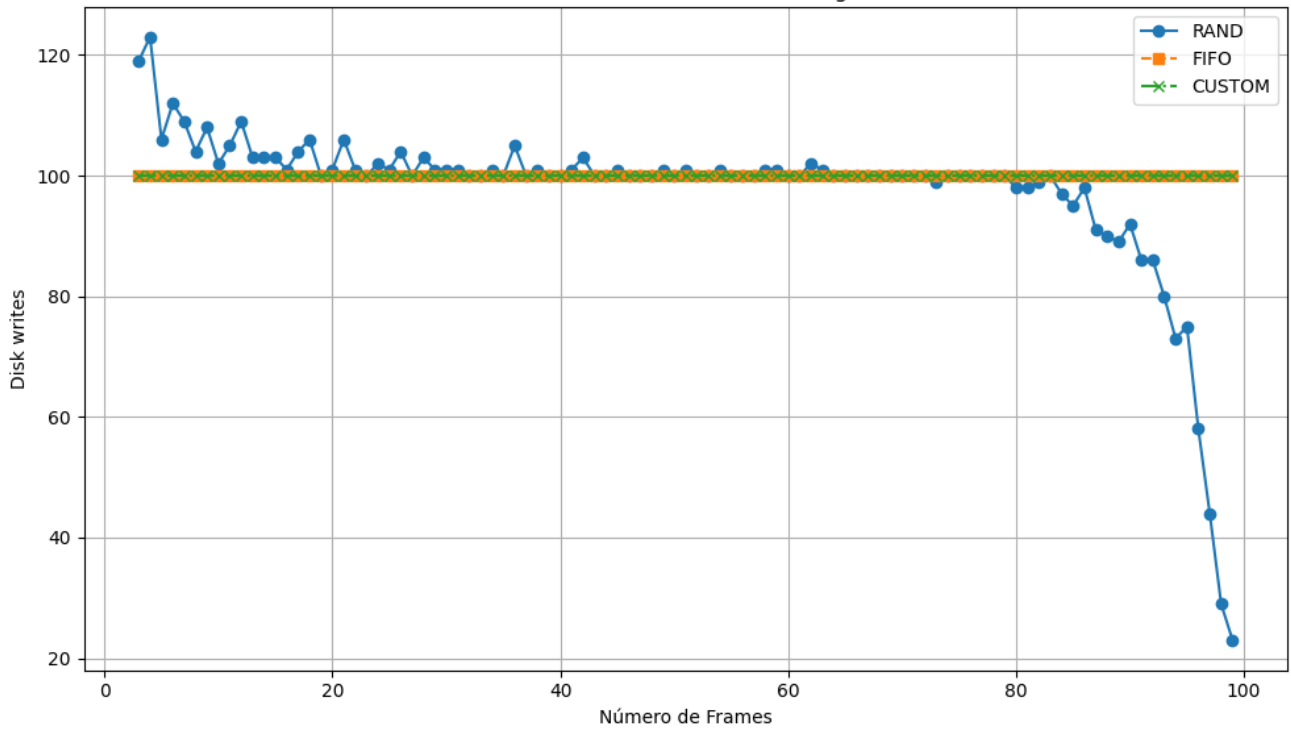
Leituras de disco

Disk reads vs. Número de Frames (gamma)

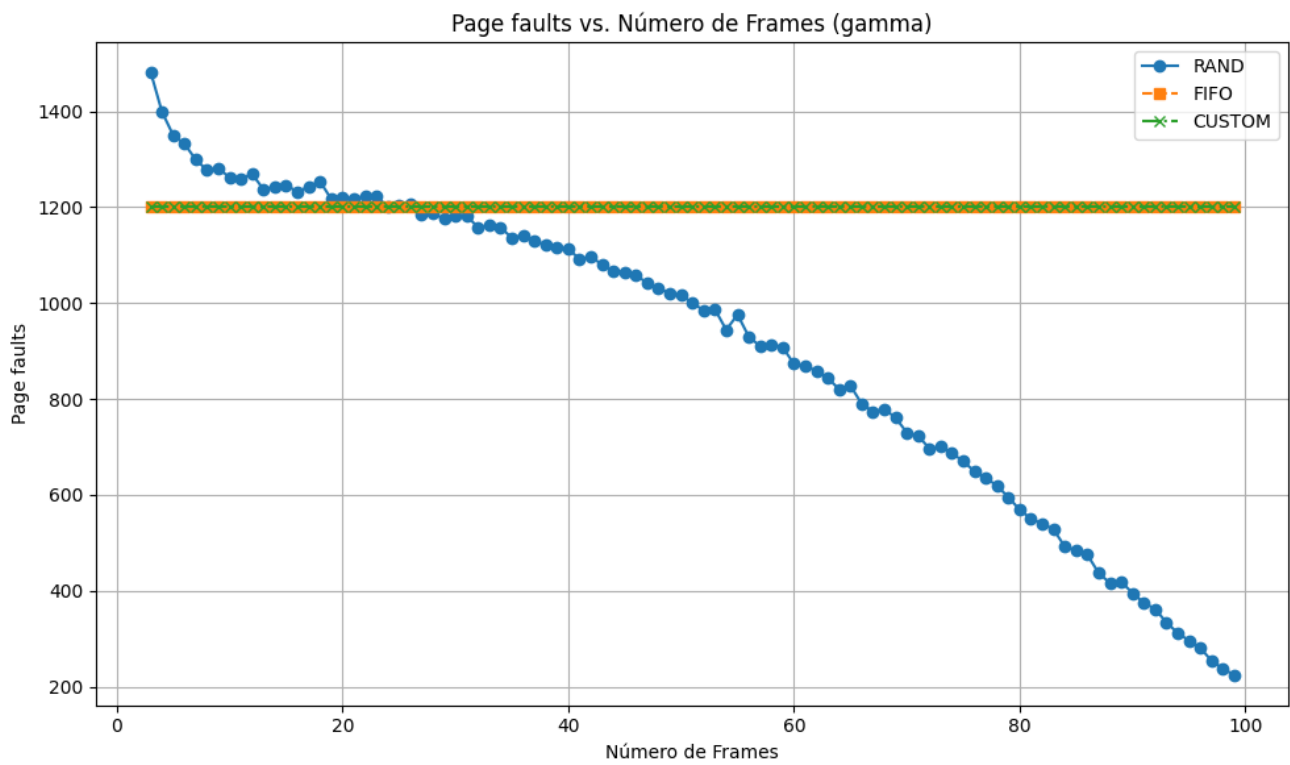


Escritas de disco

Disk writes vs. Número de Frames (gamma)

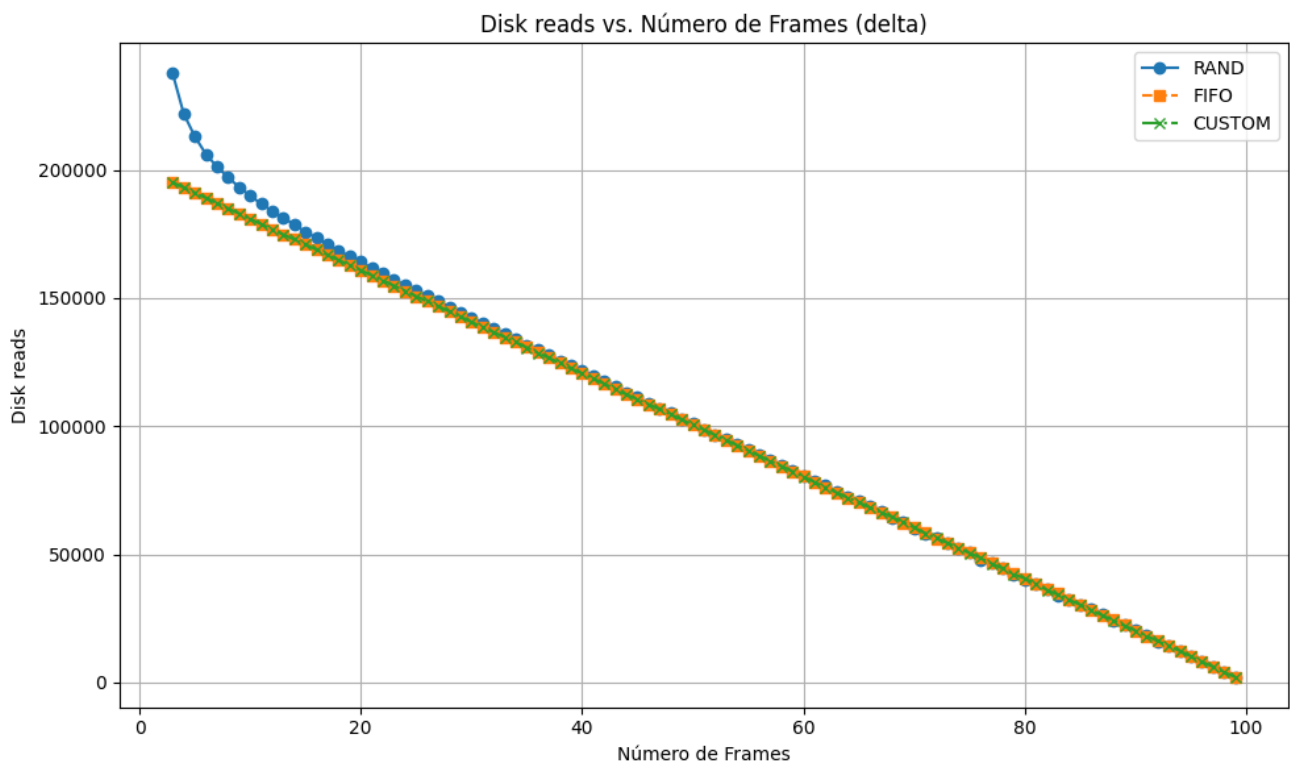


Faltas de página

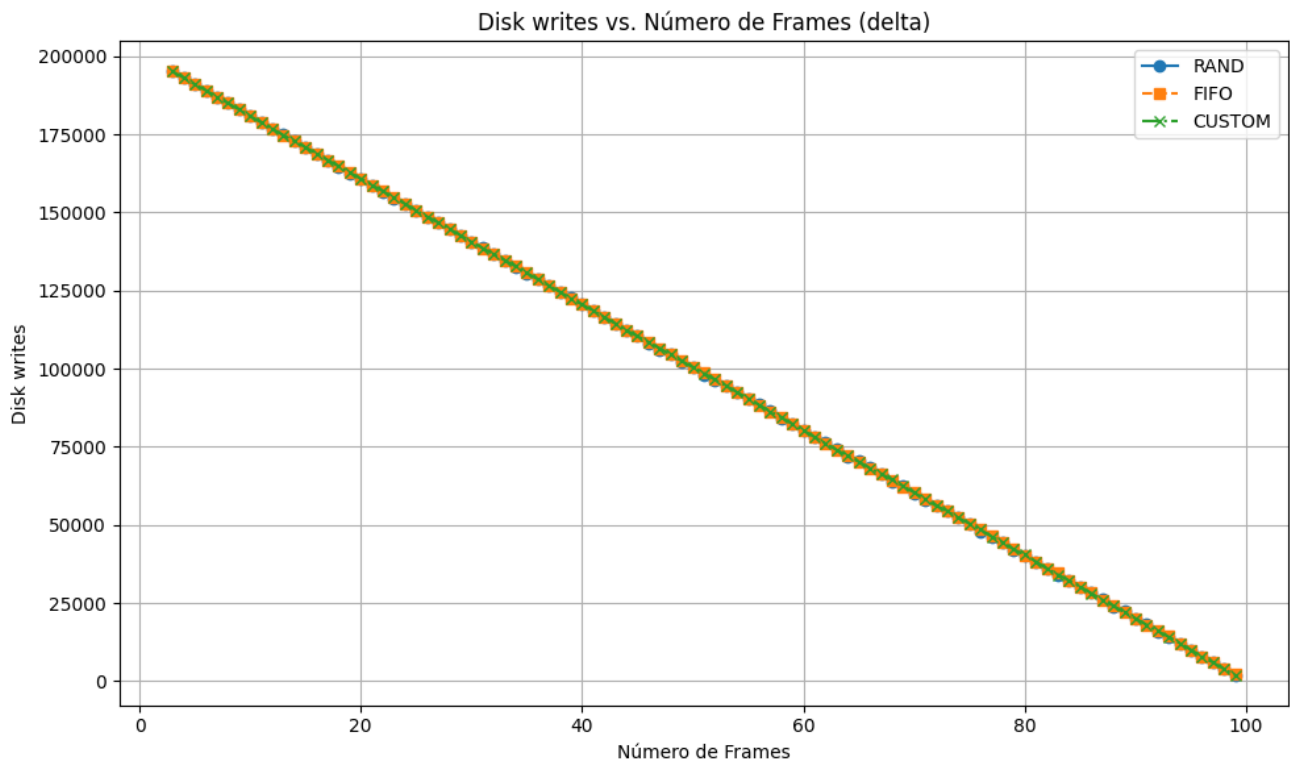


5.4 Delta

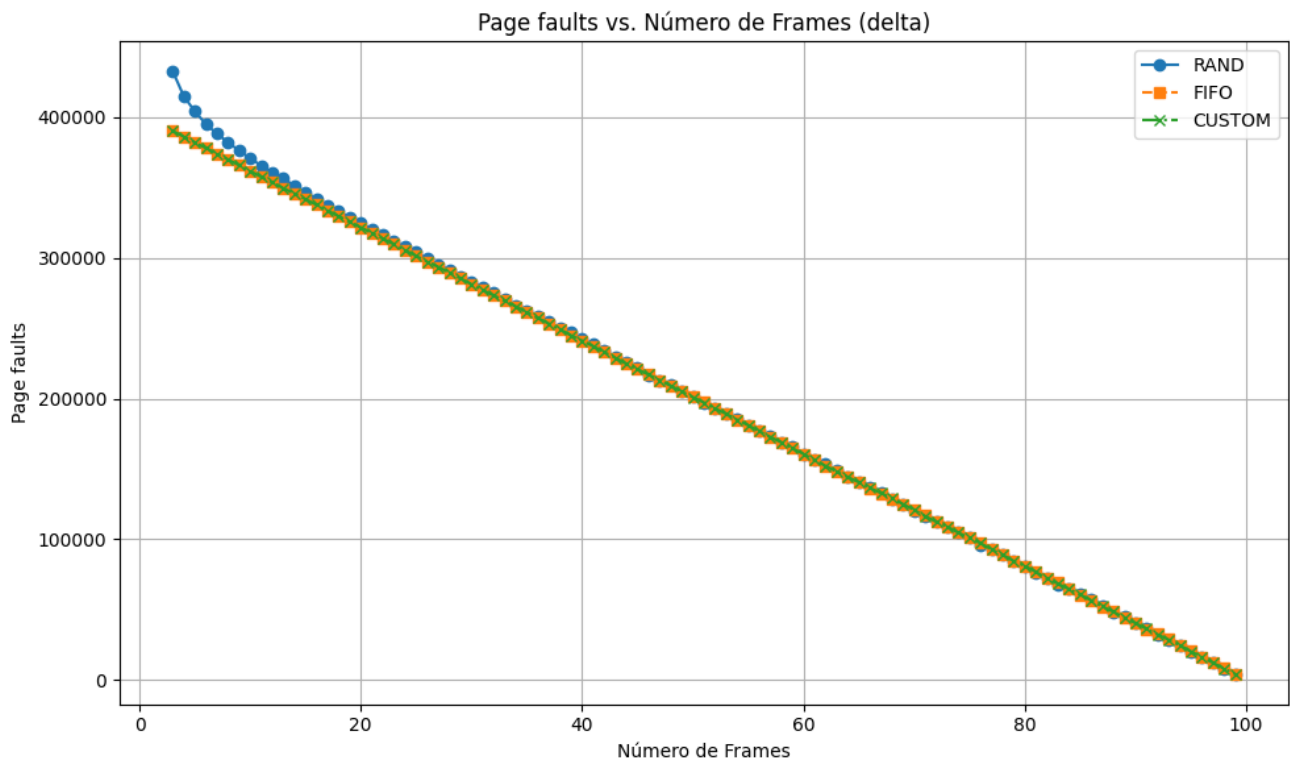
Leituras de disco



Escritas de disco



Faltas de página



Análise dos resultados

Valores iguais de **fifo** e **custom**

Ambos os algoritmos **fifo** e **custom** se comportam de maneira semelhante quando

1. As páginas não são reutilizadas dentro do espaço de frames disponíveis.
2. As páginas são acessadas em um padrão sequencial e uniforme.

Ou seja, não há reaproveitamento de páginas antes que elas sejam substituídas. Quando isso acontece, tanto **fifo** quanto **custom**

- Inserem a nova página no primeiro frame livre;
- Quando os frames estão cheios, removem a “mais antiga”:
 - **fifo** remove a página que entrou primeiro;
 - **custom** remove a página que não foi acessada há mais tempo.
- Quando não há solicitações de reutilização de páginas, ambos os algoritmos apresentam o mesmo desempenho, pois não há diferença entre remover a página mais antiga ou a menos recentemente usada.

Ou seja, os programas **alpha**, **beta**, **gamma** e **delta** não apresentam reutilização antes da substituição, não favorecem localidade temporal e, portanto, não se beneficiam de um algoritmo mais sofisticado como o **custom**.

Caráter num geral ser descendente

Os gráficos de **disk reads**, **disk writes** e **page faults** tendem a ser descendentes, pois:

1. À medida que o número de frames aumenta, mais páginas podem ser mantidas na memória, reduzindo a necessidade de leituras e escritas no disco.
2. Com mais frames, o número de faltas de página diminui, pois mais páginas podem ser mantidas na memória, reduzindo a necessidade de leituras e escritas no disco.
3. O aumento do número de frames permite que mais páginas sejam mantidas na memória, reduzindo a necessidade de substituições e, conseqüentemente, o número de faltas de página.

Comportamento constante do **gamma** com **fifo** e **custom**

O programa **gamma** apresenta um padrão constante em relação ao número de frames, tanto para **fifo** quanto para **custom**. Isso ocorre porque o programa **gamma** acessa dois grandes vetores de forma sequencial e simétrica, realizando operações de produto escalar em iterações completas. Esse padrão resulta em um comportamento previsível de falta de páginas:

1. Todas as páginas dos vetores são acessadas em sequência várias vezes. Isso gera um padrão de substituições que se repete de forma estável à medida que o número de frames aumenta.
2. Como todas as páginas são usadas com a mesma frequência e espaçamento, não há uma vantagem clara em preservar as páginas mais recentemente acessadas, o que anula a diferença entre **fifo** e **custom** (já discutido anteriormente).

Isso já não acontece com o **rand** porque o algoritmo escolhe aleatoriamente qual página remover da memória sempre que ocorre uma falta de página e não há frame livre. Dessa forma, o **rand** não apresenta um padrão constante, mas sim descendente, pois o número de frames aumenta e, conseqüentemente, o número de faltas de página diminui.

Comportamento linear descendente de **delta**

Seja com qualquer algoritmo de substituição de página, o programa **delta** apresenta, num geral, um comportamento linear descendente (em **rand** é perceptível uma tendência) para leituras de disco, escritas de disco e faltas de página. Isso ocorre porque os acessos do programa são feitos de forma aleatória, sendo altamente dispersos e com baixíssima reutilização.

Dessa forma, à medida que o número de frames aumenta, mais páginas podem ser mantidas na memória - reduzindo a chance de substituições.

Ou seja, num geral, a tendência dos gráficos é de serem descendentes, mas pelo comportamento dos programas, acontece de não serem lineares. Porém, como o **delta** é extremamente disperso, ele apresenta o "pior" caso, que é o comportamento linear descendente.

Tempo de execução

Cabe destacar que o tempo de execução do programa **delta** é significativamente maior que o dos outros programas, devido à sua natureza de acessos aleatórios e dispersos. Isso resulta em um número elevado de faltas de página e, consequentemente, em mais leituras e escritas no disco.

Isso pode ser perceptível no seguinte gráfico que compara o tempo de execução dos programas:



Tempo de Execução

Apêndice

Vazamento de memória

Durante toda a implementação do sistema, foram constantemente verificados os vazamentos de memória, utilizando o Valgrind. Dessa forma, foi possível garantir que não existam vazamentos de memória no código final. A seguir, um exemplo de execução do Valgrind:

```
valgrind ./virtmem 10 10 rand alpha --leak-check=full
```

Que retorna o seguinte **HEAP SUMMARY**:

```
==815761==
==815761== HEAP SUMMARY:
==815761==    in use at exit: 0 bytes in 0 blocks
==815761== total heap usage: 4 allocs, 4 frees, 75,328 bytes allocated
==815761==
==815761== All heap blocks were freed -- no leaks are possible
==815761==
==815761== For lists of detected and suppressed errors, rerun with: -s
==815761== ERROR SUMMARY: 0 errors from 0 contexts (suppressed: 0 from
0)
```

Ou seja, não foram encontrados vazamentos de memória durante a execução do sistema e todas as alocações de memória foram devidamente liberadas.

