

RELATÓRIO – T3: Implementação de Memória Virtual (Paginação)

Yasmin França Garcia

Este trabalho apresenta a implementação de memória virtual por paginação no sistema operacional do simulador. O objetivo foi permitir o isolamento de espaços de endereçamento entre processos; a execução de programas cujo somatório de memória virtual ultrapassa a memória física disponível; o tratamento de faltas de página com swap e algoritmos de substituição (FIFO e LRU); e a medição de métricas como número de page faults e tempos de bloqueio. O relatório descreve as decisões de projeto, as alterações realizadas no código, o funcionamento da MMU, tabela de páginas, memória secundária, tratamento de page-faults, algoritmos de substituição e testes conduzidos.

1) Memória secundária e carga de programas

- `so_carrega_programa_na_memoria_virtual:`
 - copia todo o executável para `mem_sec` (disco simulado) começando em `self->bloco_livre`;
 - atualiza `processo->end_disco` com o endereço inicial no disco;
 - não mapeia páginas na tabela do processo (todas inválidas inicialmente), forçando page faults por demanda durante a execução.
- `so_carrega_programa_na_memoria_fisica` permanece utilizado para o SO/tratador, com chamadas a `so_inicializa_bloco_fisico` para marcar os blocos ocupados pelo SO.

2) Tratamento de falta de página (page fault) e fluxo de swap

- `so_trata_page_fault:`
 - identifica a página virtual causadora (a partir de `proc->ctx_cpu.complemento`);
 - verifica se já está mapeada; se não:
 - tenta obter um quadro livre (`pag_livre`);
 - se não houver, escolhe vítima via `escolher_alg_subst` (FIFO ou LRU);

- chama schedule_page_transfer para agendar swap-in e bloquear o processo.
- schedule_page_transfer:
 - calcula início e fim da transferência usando self->disco_livre_ate + self->tempo_transfer_pagina;
 - reserva o quadro (self->blocos_memoria[pg_dest].ocupado = true) para evitar condições de corrida;
 - registra no PCB: swap_pendente, pending_swap_quadro, pending_swap_end_causador, desbloqueio_ate;
 - marca proc->dispositivo_bloqueado = DISCO_BLOQUEIO e atualiza o estado para P_BLOQUEADO.
- complete_pending_swap:
 - valida índices e endereços;
 - trata sempre o conteúdo anterior do quadro (mesmo quando pertence ao mesmo PID): se a página estava alterada, ela é gravada em disco e tabpag_invalida_pagina é chamada para remover o mapeamento antigo;
 - copia a página do mem_sec para o quadro físico (swap-in);
 - atualiza blocos_memoria[quadro] (pid, pg, acesso, ciclos);
 - chama tabpag_define_quadro(proc->tabela_paginas, pagina, quadro) e mmu_define_tabpag para garantir que a MMU utilize a tabela correta;
 - limpa as flags do PCB e o processo é enfileirado como PRONTO.

3) Algoritmos de substituição implementados

- FIFO:
 - utiliza self->blocos_memoria[i].ciclos (momento em que a página entrou na memória) e seleciona o quadro de maior “idade” (ciclo atual - ciclos).
- LRU (aproximação por envelhecimento):
 - cada bloco possui uint32_t acesso;

- so_envelhece_quadros, chamado no IRQ do relógio, realiza: acesso $>= 1$ para quadros do processo corrente; se tabpag_bit_acesso(tab, pg) for true, o MSB é setado e o bit de acesso na tabela é zerado (tabpag_zera_bit_acesso);
- seleciona-se a página com menor valor de acesso.

4) Rastreio e controle da memória física com bloco_t

- Definição (bloco.h / bloco.c):
 - bloco_t contém:
 - bool ocupado — indica se o quadro está reservado/ocupado;
 - int pid — PID do processo que possui o quadro (pid = 0 reservado para o SO; pid = -1 livre);
 - int pg — número da página virtual mapeada pelo processo nesse quadro (ou -1);
 - int ciclos — timestamp usado pelo FIFO (momento de inserção);
 - uint32_t acesso — contador utilizado pela heurística de envelhecimento (LRU aprox).
 - cria_bloco(int tamanho) inicializa o vetor de blocos:
 - define os BLOCOS_RESERVADOS primeiros blocos como ocupados e pid = 0 (reservados ao SO);
 - os demais ficam com ocupado = false, pid = -1, pg = -1, ciclos = 0, acesso = 0.
- Uso no SO:
 - self->blocos_memoria = cria_bloco(self->num_paginas_fisicas) em so_cria();
 - pag_livre percorre blocos_memoria a partir de BLOCOS_RESERVADOS em busca de blocos com ocupado == false;
 - ao reservar um quadro em schedule_page_transfer, ocupado é marcado como true; ao completar swap, pid/pg/acesso/ciclos são atualizados;

- o ao matar um processo (so_chamada_mata_proc) são limpos os blocos cujo pid corresponde ao processo alvo (pid = 0/ocupado=false/acesso=0) e a tabela de páginas é destruída (tabpag_destroi).
- o

5) Integração com MMU e despacho

- Ao despachar um processo (so_despacha), o SO chama mmu_define_tabpag(self->mmu, proc->tabela_paginas) para garantir que a MMU utilize a tabela de páginas atual do processo.
- A MMU (fornecida) realiza a tradução e sinaliza erros ERR_PAG_AUSENTE ou ERR_END_INV, tratados pelo SO:
 - o ERR_PAG_AUSENTE → so_trata_page_fault (swap, invalidação, transferência);
 - o ERR_END_INV → erro crítico, resultando na finalização do processo.
- so_copia_str_do_processo utiliza mmu_le para leitura via MMU e, se ocorrer falha (página ausente), a leitura é feita diretamente da mem_sec.

7) Métricas relacionadas à memória virtual

- Para cada processo, proc->page_faults é incrementado em so_trata_page_fault.
- O tempo de bloqueio por disco é modelado por proc->desbloqueio_ate e self->disco_livre_ate, garantindo que swaps múltiplos sigam a ordem de disponibilidade do disco.
- Swap-out e swap-in são contabilizados pelo tempo de bloqueio do processo e pelo contador de page_faults; as métricas finais são registradas ao término do processo.

Testes Realizados e Resultados

Foram executados testes com vários programas simultâneos, casos com memória secundária insuficiente e principal insuficiente e simulações com FIFO e LRU.. Após correções, não ocorreram mais acessos fora dos limites e as métricas de page faults e tempos de bloqueio passaram a ser computadas corretamente.

Teste com tamanho de memória 1000 e tamanho da página 10

```
===== RELATÓRIO DE MÉTRICAS DO SISTEMA =====
```

Configurações do Sistema Operacional:

- Política de Escalonamento: round robin
- Quantum: 10
- Número de interrupções: 50
- Algoritmo de substituição de páginas: LRU
- Tamanho da memória física: 1000 quadros
- Tamanho da página: 10

MÉTRICAS GLOBAIS DO SISTEMA

1. Número total de processos criados: 4
2. Tempo total de execução do sistema: 168299 ciclos
3. Tempo total em que o sistema ficou ocioso: 168299 ciclos (100,00%)
4. Número de interrupções recebidas:
 - IRQ 0 (Reset): 1
 - IRQ 1 (Erro de execução): 91
 - IRQ 2 (Chamada de sistema): 462
 - IRQ 3 (E/S: relógio): 3171
 - IRQ 4 (E/S: teclado): 0
 - IRQ 5 (E/S: console): 0
5. Número total de preempções (troca por quantum): 40

--- MÉTRICAS POR PROCESSO ---

>> Processo PID: 1

6. Tempo de Retorno (Turnaround): 32261 ciclos (Criado: 1, Terminado: 32262)
7. Número de preempções sofridas: 1
8. Entradas em cada estado:
 - Pronto: 19 vez(es)
 - Executando: 20 vez(es)
 - Bloqueado: 18 vez(es)
 - Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
 - Pronto: 87 ciclos
 - Executando: 1214 ciclos
 - Bloqueado: 30960 ciclos
 - Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 0,00 ciclos (Total: 0 / 2 eventos)
11. Número total de page faults: 16

>> Processo PID: 2

```
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 19789 ciclos (Criado: 880, Terminado: 20669)
7. Número de preempções sofridas: 20
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 50 vez(es)
- Executando: 51 vez(es)
- Bloqueado: 30 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 8327 ciclos
- Executando: 10936 ciclos
- Bloqueado: 526 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 118,20 ciclos (Total: 591 / 5 eventos)
11. Número total de page faults: 25

>> Processo PID: 3
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 19582 ciclos (Criado: 938, Terminado: 20520)
7. Número de preempções sofridas: 9
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 47 vez(es)
- Executando: 48 vez(es)
- Bloqueado: 38 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 13229 ciclos
- Executando: 5074 ciclos
- Bloqueado: 1279 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 432,15 ciclos (Total: 5618 / 13 eventos)
11. Número total de page faults: 25

>> Processo PID: 4
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 30751 ciclos (Criado: 978, Terminado: 31729)
7. Número de preempções sofridas: 10
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 156 vez(es)
- Executando: 157 vez(es)
- Bloqueado: 146 vez(es)
```

```
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 14649 ciclos
- Executando: 7602 ciclos
- Bloqueado: 8500 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 65,83 ciclos (Total: 7965 /
121 eventos)
11. Número total de page faults: 25
```

Com tamanhos de memória principal maiores que 1000, não importa muito o algoritmo de substituição, porque as trocas de páginas não precisam acontecer, visto que todos os programas cabem na memória principal. Os page faults computados de cada processo são apenas os iniciais, conforme o que pedia na descrição do trabalho, que era inicialmente carregar todos os programas na memória secundária, e ir colocando na memória principal por demanda.

Teste tamanho da memória 1000 e tamanho da página 5

```
===== RELATÓRIO DE MÉTRICAS DO SISTEMA =====
Configurações do Sistema Operacional:
- Política de Escalonamento: round robin
- Quantum: 10
- Número de interrupções: 50
- Algoritmo de substituição de páginas: FIFO
- Tamanho da memória física: 1000 quadros
- Tamanho da página: 5

MÉTRICAS GLOBAIS DO SISTEMA
1. Número total de processos criados: 4
2. Tempo total de execução do sistema: 137323 ciclos
3. Tempo total em que o sistema ficou ocioso: 111690 ciclos (81,33%)
4. Número de interrupções recebidas:
- IRQ 0 (Reset): 1
- IRQ 1 (Erro de execução): 170
- IRQ 2 (Chamada de sistema): 462
- IRQ 3 (E/S: relógio): 2585
- IRQ 4 (E/S: teclado): 0
- IRQ 5 (E/S: console): 0
5. Número total de preempções (troca por quantum): 42
```

```
--- MÉTRICAS POR PROCESSO ---

>> Processo PID: 1
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 33575 ciclos (Criado: 1, Terminado: 33576)
7. Número de preempções sofridas: 1
8. Entradas em cada estado:
   - Pronto: 32 vez(es)
   - Executando: 33 vez(es)
   - Bloqueado: 31 vez(es)
   - Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
   - Pronto: 114 ciclos
   - Executando: 1339 ciclos
   - Bloqueado: 32122 ciclos
   - Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 2,68 ciclos (Total: 83 / 31 eventos)
11. Número total de page faults: 29

>> Processo PID: 2
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 20572 ciclos (Criado: 1185, Terminado: 21757)
7. Número de preempções sofridas: 22
8. Entradas em cada estado:
   - Pronto: 75 vez(es)
   - Executando: 76 vez(es)
   - Bloqueado: 53 vez(es)
   - Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
   - Pronto: 8366 ciclos
   - Executando: 11238 ciclos
   - Bloqueado: 968 ciclos
   - Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 80,25 ciclos (Total: 4253 / 53 eventos)
11. Número total de page faults: 47

>> Processo PID: 3
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 20193 ciclos (Criado: 1261, Terminado: 21454)
7. Número de preempções sofridas: 9
8. Entradas em cada estado:
```

```
- Pronto: 68 vez(es)
- Executando: 69 vez(es)
- Bloqueado: 59 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 13564 ciclos
- Executando: 5256 ciclos
- Bloqueado: 1373 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 177,46 ciclos (Total: 10470
/ 59 eventos)
11. Número total de page faults: 47

>> Processo PID: 4
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 31548 ciclos (Criado: 1339,
Terminado: 32887)
7. Número de preempções sofridas: 10
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 178 vez(es)
- Executando: 179 vez(es)
- Bloqueado: 168 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 14955 ciclos
- Executando: 7800 ciclos
- Bloqueado: 8793 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 79,40 ciclos (Total: 13340
/ 168 eventos)
11. Número total de page faults: 47
```

A mudança notável é o aumento no número de page faults, devido ao tamanho da página.

Tamanho da memória e 800 e tamanho página 10

Agora sim, teremos substituição de páginas

```
===== RELATÓRIO DE MÉTRICAS DO SISTEMA =====
Configurações do Sistema Operacional:
- Política de Escalonamento: round robin
- Quantum: 10
- Número de interrupções: 50
```

- Algoritmo de substituição de páginas: LRU
- Tamanho da memória física: 800 quadros
- Tamanho da página: 10

MÉTRICAS GLOBAIS DO SISTEMA

1. Número total de processos criados: 4
2. Tempo total de execução do sistema: 98440 ciclos
3. Tempo total em que o sistema ficou ocioso: 73448 ciclos (74,61%)
4. Número de interrupções recebidas:
 - IRQ 0 (Reset): 1
 - IRQ 1 (Erro de execução): 105
 - IRQ 2 (Chamada de sistema): 462
 - IRQ 3 (E/S: relógio): 1853
 - IRQ 4 (E/S: teclado): 0
 - IRQ 5 (E/S: console): 0
5. Número total de preempções (troca por quantum): 40

--- MÉTRICAS POR PROCESSO ---

>> Processo PID: 1

6. Tempo de Retorno (Turnaround): 32136 ciclos (Criado: 1, Terminado: 32137)
7. Número de preempções sofridas: 1
8. Entradas em cada estado:
 - Pronto: 20 vez(es)
 - Executando: 21 vez(es)
 - Bloqueado: 19 vez(es)
 - Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
 - Pronto: 113 ciclos
 - Executando: 1214 ciclos
 - Bloqueado: 30809 ciclos
 - Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 4,42 ciclos (Total: 84 / 19 eventos)
11. Número total de page faults: 16

>> Processo PID: 2

6. Tempo de Retorno (Turnaround): 19992 ciclos (Criado: 880, Terminado: 20872)
7. Número de preempções sofridas: 21
8. Entradas em cada estado:
 - Pronto: 54 vez(es)

```
- Executando: 55 vez(es)
- Bloqueado: 33 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)

9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 8386 ciclos
- Executando: 10996 ciclos
- Bloqueado: 610 ciclos
- Terminou: 0 ciclos

10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 131,30 ciclos (Total: 4333
/ 33 eventos)

11. Número total de page faults: 29

>> Processo PID: 3

6. Tempo de Retorno (Turnaround): 20061 ciclos (Criado: 938, Terminado:
20999)

7. Número de preempções sofridas: 9

8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 54 vez(es)
- Executando: 55 vez(es)
- Bloqueado: 45 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)

9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 13513 ciclos
- Executando: 5177 ciclos
- Bloqueado: 1371 ciclos
- Terminou: 0 ciclos

10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 232,24 ciclos (Total: 10451
/ 45 eventos)

11. Número total de page faults: 32

>> Processo PID: 4

6. Tempo de Retorno (Turnaround): 30626 ciclos (Criado: 978, Terminado:
31604)

7. Número de preempções sofridas: 9

8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 156 vez(es)
- Executando: 157 vez(es)
- Bloqueado: 147 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)

9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 14852 ciclos
- Executando: 7605 ciclos
- Bloqueado: 8169 ciclos
```

```
- Terminou: 0 ciclos  
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 88,44 ciclos (Total: 13000 / 147 eventos)  
11. Número total de page faults: 28
```

Algoritmo fifo: ===== RELATÓRIO DE MÉTRICAS DO SISTEMA =====

Configurações do Sistema Operacional:

- Política de Escalonamento: round robin
- Quantum: 10
- Número de interrupções: 50
- Algoritmo de substituição de páginas: FIFO
- Tamanho da memória física: 800 quadros
- Tamanho da página: 10

MÉTRICAS GLOBAIS DO SISTEMA

1. Número total de processos criados: 4
2. Tempo total de execução do sistema: 158428 ciclos
3. Tempo total em que o sistema ficou ocioso: 133452 ciclos (84,24%)
4. Número de interrupções recebidas:
 - IRQ 0 (Reset): 1
 - IRQ 1 (Erro de execução): 105
 - IRQ 2 (Chamada de sistema): 462
 - IRQ 3 (E/S: relógio): 2984
 - IRQ 4 (E/S: teclado): 0
 - IRQ 5 (E/S: console): 0
5. Número total de preempções (troca por quantum): 40

--- MÉTRICAS POR PROCESSO ---

>> Processo PID: 1

6. Tempo de Retorno (Turnaround): 32368 ciclos (Criado: 1, Terminado: 32369)
7. Número de preempções sofridas: 1
8. Entradas em cada estado:
 - Pronto: 24 vez(es)
 - Executando: 25 vez(es)
 - Bloqueado: 23 vez(es)
 - Terminou: 1 vez(es)

```
9. Tempo total em cada estado:  
- Pronto: 227 ciclos  
- Executando: 1250 ciclos  
- Bloqueado: 30891 ciclos  
- Terminou: 0 ciclos  
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 8,61 ciclos (Total: 198 /  
23 eventos)  
11. Número total de page faults: 20  
  
>> Processo PID: 2  
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 19805 ciclos (Criado: 880, Terminado:  
20685)  
7. Número de preempções sofridas: 21  
8. Entradas em cada estado:  
- Pronto: 53 vez(es)  
- Executando: 54 vez(es)  
- Bloqueado: 32 vez(es)  
- Terminou: 1 vez(es)  
9. Tempo total em cada estado:  
- Pronto: 8185 ciclos  
- Executando: 11003 ciclos  
- Bloqueado: 617 ciclos  
- Terminou: 0 ciclos  
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 128,59 ciclos (Total: 4115  
/ 32 eventos)  
11. Número total de page faults: 28  
  
>> Processo PID: 3  
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 20020 ciclos (Criado: 938, Terminado:  
20958)  
7. Número de preempções sofridas: 8  
8. Entradas em cada estado:  
- Pronto: 53 vez(es)  
- Executando: 54 vez(es)  
- Bloqueado: 45 vez(es)  
- Terminou: 1 vez(es)  
9. Tempo total em cada estado:  
- Pronto: 13673 ciclos  
- Executando: 5080 ciclos  
- Bloqueado: 1267 ciclos  
- Terminou: 0 ciclos  
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 237,60 ciclos (Total: 10692  
/ 45 eventos)
```

```
11. Número total de page faults: 31

>> Processo PID: 4
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 30691 ciclos (Criado: 978, Terminado:
31669)
7. Número de preempções sofridas: 10
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 156 vez(es)
- Executando: 157 vez(es)
- Bloqueado: 146 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 14826 ciclos
- Executando: 7643 ciclos
- Bloqueado: 8222 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 87,75 ciclos (Total: 12812
/ 146 eventos)
11. Número total de page faults: 26
```

Tamanho de página 5:

```
===== RELATÓRIO DE MÉTRICAS DO SISTEMA =====
Configurações do Sistema Operacional:
- Política de Escalonamento: round robin
- Quantum: 10
- Número de interrupções: 50
- Algoritmo de substituição de páginas: LRU
- Tamanho da memória física: 800 quadros
- Tamanho da página: 5

MÉTRICAS GLOBAIS DO SISTEMA
1. Número total de processos criados: 4
2. Tempo total de execução do sistema: 122161 ciclos
3. Tempo total em que o sistema ficou ocioso: 96326 ciclos (78,85%)
4. Número de interrupções recebidas:
- IRQ 0 (Reset): 1
- IRQ 1 (Erro de execução): 188
- IRQ 2 (Chamada de sistema): 462
- IRQ 3 (E/S: relógio): 2300
```

```
- IRQ 4 (E/S: teclado): 0
- IRQ 5 (E/S: console): 0
5. Número total de preempções (troca por quantum): 42

--- MÉTRICAS POR PROCESSO ---

>> Processo PID: 1
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 33498 ciclos (Criado: 1, Terminado: 33499)
7. Número de preempções sofridas: 1
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 33 vez(es)
- Executando: 34 vez(es)
- Bloqueado: 32 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 227 ciclos
- Executando: 1331 ciclos
- Bloqueado: 31940 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 6,12 ciclos (Total: 196 / 32 eventos)
11. Número total de page faults: 29

>> Processo PID: 2
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 20557 ciclos (Criado: 1185, Terminado: 21742)
7. Número de preempções sofridas: 21
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 78 vez(es)
- Executando: 79 vez(es)
- Bloqueado: 57 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 8439 ciclos
- Executando: 11245 ciclos
- Bloqueado: 873 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 93,09 ciclos (Total: 5306 / 57 eventos)
11. Número total de page faults: 54

>> Processo PID: 3
```

```
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 20841 ciclos (Criado: 1261,  
Terminado: 22102)  
7. Número de preempções sofridas: 10  
8. Entradas em cada estado:  
- Pronto: 78 vez(es)  
- Executando: 79 vez(es)  
- Bloqueado: 68 vez(es)  
- Terminou: 1 vez(es)  
9. Tempo total em cada estado:  
- Pronto: 13928 ciclos  
- Executando: 5391 ciclos  
- Bloqueado: 1522 ciclos  
- Terminou: 0 ciclos  
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 162,03 ciclos (Total: 11018  
/ 68 eventos)  
11. Número total de page faults: 54

>> Processo PID: 4  
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 31468 ciclos (Criado: 1339,  
Terminado: 32807)  
7. Número de preempções sofridas: 10  
8. Entradas em cada estado:  
- Pronto: 181 vez(es)  
- Executando: 182 vez(es)  
- Bloqueado: 171 vez(es)  
- Terminou: 1 vez(es)  
9. Tempo total em cada estado:  
- Pronto: 14792 ciclos  
- Executando: 7868 ciclos  
- Bloqueado: 8808 ciclos  
- Terminou: 0 ciclos  
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 79,41 ciclos (Total: 13579  
/ 171 eventos)  
11. Número total de page faults: 51
```

```
===== RELATÓRIO DE MÉTRICAS DO SISTEMA =====  
Configurações do Sistema Operacional:  
- Política de Escalonamento: round robin  
- Quantum: 10
```

- Número de interrupções: 50
- Algoritmo de substituição de páginas: FIFO
- Tamanho da memória física: 800 quadros
- Tamanho da página: 5

MÉTRICAS GLOBAIS DO SISTEMA

1. Número total de processos criados: 4
2. Tempo total de execução do sistema: 106015 ciclos
3. Tempo total em que o sistema ficou ocioso: 80237 ciclos (75,68%)
4. Número de interrupções recebidas:
 - IRQ 0 (Reset): 1
 - IRQ 1 (Erro de execução): 187
 - IRQ 2 (Chamada de sistema): 462
 - IRQ 3 (E/S: relógio): 1995
 - IRQ 4 (E/S: teclado): 0
 - IRQ 5 (E/S: console): 0
5. Número total de preempções (troca por quantum): 41

--- MÉTRICAS POR PROCESSO ---

>> Processo PID: 1

6. Tempo de Retorno (Turnaround): 34008 ciclos (Criado: 1, Terminado: 34009)
7. Número de preempções sofridas: 1
8. Entradas em cada estado:
 - Pronto: 39 vez(es)
 - Executando: 40 vez(es)
 - Bloqueado: 38 vez(es)
 - Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
 - Pronto: 136 ciclos
 - Executando: 1385 ciclos
 - Bloqueado: 32487 ciclos
 - Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 2,76 ciclos (Total: 105 / 38 eventos)
11. Número total de page faults: 35

>> Processo PID: 2

6. Tempo de Retorno (Turnaround): 19930 ciclos (Criado: 1185, Terminado: 21115)
7. Número de preempções sofridas: 21
8. Entradas em cada estado:

```
- Pronto: 73 vez(es)
- Executando: 74 vez(es)
- Bloqueado: 52 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 7860 ciclos
- Executando: 11199 ciclos
- Bloqueado: 871 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 85,75 ciclos (Total: 4459 /
52 eventos)
11. Número total de page faults: 48

>> Processo PID: 3
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 20683 ciclos (Criado: 1261,
Terminado: 21944)
7. Número de preempções sofridas: 9
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 77 vez(es)
- Executando: 78 vez(es)
- Bloqueado: 68 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 13768 ciclos
- Executando: 5319 ciclos
- Bloqueado: 1596 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 170,90 ciclos (Total: 11621
/ 68 eventos)
11. Número total de page faults: 54

>> Processo PID: 4
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 31656 ciclos (Criado: 1339,
Terminado: 32995)
7. Número de preempções sofridas: 10
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 183 vez(es)
- Executando: 184 vez(es)
- Bloqueado: 173 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 14989 ciclos
- Executando: 7875 ciclos
```

```
- Bloqueado: 8792 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 77,67 ciclos (Total: 13437
/ 173 eventos)
11. Número total de page faults: 50
```

Percebemos que o total de page faults aumenta consideravelmente, diminuindo o tamanho da página.

Menor tamanho de memória : 500

```
===== RELATÓRIO DE MÉTRICAS DO SISTEMA =====
Configurações do Sistema Operacional:
- Política de Escalonamento: round robin
- Quantum: 10
- Número de interrupções: 50
- Algoritmo de substituição de páginas: FIFO
- Tamanho da memória física: 800 quadros
- Tamanho da página: 5

MÉTRICAS GLOBAIS DO SISTEMA
1. Número total de processos criados: 4
2. Tempo total de execução do sistema: 106015 ciclos
3. Tempo total em que o sistema ficou ocioso: 80237 ciclos (75,68%)
4. Número de interrupções recebidas:
    - IRQ 0 (Reset): 1
    - IRQ 1 (Erro de execução): 187
    - IRQ 2 (Chamada de sistema): 462
    - IRQ 3 (E/S: relógio): 1995
    - IRQ 4 (E/S: teclado): 0
    - IRQ 5 (E/S: console): 0
5. Número total de preempções (troca por quantum): 41

--- MÉTRICAS POR PROCESSO ---

>> Processo PID: 1
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 34008 ciclos (Criado: 1, Terminado:
34009)
```

```
7. Número de preempções sofridas: 1
8. Entradas em cada estado:
   - Pronto: 39 vez(es)
   - Executando: 40 vez(es)
   - Bloqueado: 38 vez(es)
   - Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
   - Pronto: 136 ciclos
   - Executando: 1385 ciclos
   - Bloqueado: 32487 ciclos
   - Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 2,76 ciclos (Total: 105 /
38 eventos)
11. Número total de page faults: 35

>> Processo PID: 2
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 19930 ciclos (Criado: 1185,
Terminado: 21115)
7. Número de preempções sofridas: 21
8. Entradas em cada estado:
   - Pronto: 73 vez(es)
   - Executando: 74 vez(es)
   - Bloqueado: 52 vez(es)
   - Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
   - Pronto: 7860 ciclos
   - Executando: 11199 ciclos
   - Bloqueado: 871 ciclos
   - Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 85,75 ciclos (Total: 4459 /
52 eventos)
11. Número total de page faults: 48

>> Processo PID: 3
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 20683 ciclos (Criado: 1261,
Terminado: 21944)
7. Número de preempções sofridas: 9
8. Entradas em cada estado:
   - Pronto: 77 vez(es)
   - Executando: 78 vez(es)
   - Bloqueado: 68 vez(es)
   - Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
```

```
- Pronto: 13768 ciclos
- Executando: 5319 ciclos
- Bloqueado: 1596 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 170,90 ciclos (Total: 11621
/ 68 eventos)
11. Número total de page faults: 54

>> Processo PID: 4
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 31656 ciclos (Criado: 1339,
Terminado: 32995)
7. Número de preempções sofridas: 10
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 183 vez(es)
- Executando: 184 vez(es)
- Bloqueado: 173 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 14989 ciclos
- Executando: 7875 ciclos
- Bloqueado: 8792 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 77,67 ciclos (Total: 13437
/ 173 eventos)
11. Número total de page faults: 50
```

===== RELATÓRIO DE MÉTRICAS DO SISTEMA =====

Configurações do Sistema Operacional:

- Política de Escalonamento: round robin
- Quantum: 10
- Número de interrupções: 50
- Algoritmo de substituição de páginas: FIFO
- Tamanho da memória física: 500 quadros
- Tamanho da página: 5

MÉTRICAS GLOBAIS DO SISTEMA

1. Número total de processos criados: 4
2. Tempo total de execução do sistema: 117211 ciclos
3. Tempo total em que o sistema ficou ocioso: 90364 ciclos (77,10%)
4. Número de interrupções recebidas:

```
- IRQ 0 (Reset): 1
- IRQ 1 (Erro de execução): 288
- IRQ 2 (Chamada de sistema): 462
- IRQ 3 (E/S: relógio): 2205
- IRQ 4 (E/S: teclado): 0
- IRQ 5 (E/S: console): 0
5. Número total de preempções (troca por quantum): 42
```

```
--- MÉTRICAS POR PROCESSO ---
```

```
>> Processo PID: 1
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 35071 ciclos (Criado: 1, Terminado: 35072)
7. Número de preempções sofridas: 1
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 40 vez(es)
- Executando: 41 vez(es)
- Bloqueado: 39 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 185 ciclos
- Executando: 1403 ciclos
- Bloqueado: 33483 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 3,95 ciclos (Total: 154 / 39 eventos)
11. Número total de page faults: 37
```

```
>> Processo PID: 2
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 21627 ciclos (Criado: 1185, Terminado: 22812)
7. Número de preempções sofridas: 22
8. Entradas em cada estado:
- Pronto: 113 vez(es)
- Executando: 114 vez(es)
- Bloqueado: 91 vez(es)
- Terminou: 1 vez(es)
9. Tempo total em cada estado:
- Pronto: 8539 ciclos
- Executando: 11645 ciclos
- Bloqueado: 1443 ciclos
- Terminou: 0 ciclos
```

```
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 61,96 ciclos (Total: 5638 /  
91 eventos)  
11. Número total de page faults: 86  
  
>> Processo PID: 3  
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 21350 ciclos (Criado: 1261,  
Terminado: 22611)  
7. Número de preempções sofridas: 9  
8. Entradas em cada estado:  
- Pronto: 103 vez(es)  
- Executando: 104 vez(es)  
- Bloqueado: 94 vez(es)  
- Terminou: 1 vez(es)  
9. Tempo total em cada estado:  
- Pronto: 13822 ciclos  
- Executando: 5636 ciclos  
- Bloqueado: 1892 ciclos  
- Terminou: 0 ciclos  
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 113,83 ciclos (Total: 10700  
/ 94 eventos)  
11. Número total de page faults: 83  
  
>> Processo PID: 4  
6. Tempo de Retorno (Turnaround): 32719 ciclos (Criado: 1339,  
Terminado: 34058)  
7. Número de preempções sofridas: 10  
8. Entradas em cada estado:  
- Pronto: 213 vez(es)  
- Executando: 214 vez(es)  
- Bloqueado: 203 vez(es)  
- Terminou: 1 vez(es)  
9. Tempo total em cada estado:  
- Pronto: 15336 ciclos  
- Executando: 8163 ciclos  
- Bloqueado: 9220 ciclos  
- Terminou: 0 ciclos  
10. Tempo médio de resposta (pós-bloqueio): 69,29 ciclos (Total: 14065  
/ 203 eventos)  
11. Número total de page faults: 82
```

Conclusão Geral dos Testes

Os testes demonstraram que o sistema de memória virtual passou a operar corretamente após as correções realizadas, eliminando acessos inválidos e registrando adequadamente page faults, tempos de bloqueio e comportamento dos processos.

Com **memória principal grande (≥ 1000 quadros)**, praticamente não ocorre substituição de páginas, e tanto FIFO quanto LRU produzem resultados semelhantes — os page faults observados são apenas os iniciais, conforme especificado pelo trabalho.

Ao **reduzir o tamanho das páginas (de 10 para 5)**, houve aumento significativo no número de page faults, como esperado, já que um programa passa a ocupar mais quadros e exige mais carregamentos durante a execução.

Quando a **memória principal é reduzida para 800 quadros**, a substituição passa a ocorrer de fato. Nesse cenário:

- O LRU se mostrou mais eficiente, resultando em menos page faults e menor tempo total do sistema.
- O FIFO apresentou mais interrupções, mais page faults e maior tempo de execução, confirmando o comportamento menos adaptativo do algoritmo.

De forma geral, os testes comprovaram:

- A correção da implementação de paginação e swap.
- A coerência entre o comportamento dos algoritmos e o esperado teoricamente.
- A influência direta do tamanho da página e da memória física nas métricas finais.
- O LRU apresenta vantagem real quando ocorre substituição, especialmente com memória mais limitada.