
SIMULADOR DE CACHE E MEMÓRIA VIRTUAL

Trabalho prático final da disciplina GCC117 – Arquitetura de Computadores I – 2017/2 – Turmas 10AB e 22ª – Prof. André Vital Saúde

Implementar um simulador de memória cache e memória virtual, seguindo os requisitos descritos a seguir.

1 GRUPOS

O trabalho será realizado em grupos de no mínimo 4 e no máximo 5 pessoas. Se aparecerem pessoas sem grupo com este número de pessoas, a primeira coisa a ser feita será a tentativa de aloca-los em grupos que estejam apenas com 4 pessoas, mas se não for possível, serão retirados membros de grupos de 5 pessoas, aleatoriamente, para criar um novo grupo.

2 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO E APRESENTAÇÃO

O trabalho pode ser implementado em qualquer linguagem de programação de interesse, desde que atenda aos requisitos de teste e interação com usuário e de operações lógicas bit a bit (ver Seção 1.4 deste link https://en.wikipedia.org/wiki/Operators_in_C_and_C%2B%2B).

3 ORGANIZAÇÃO E COMPONENTES DO SOFTWARE

Será implementada a hierarquia de memória nos moldes da arquitetura do Core i7, contendo:

1. cache L1 de dados, dentro do núcleo
2. cache L1 de instruções, dentro do núcleo
3. cache L2 de dados e instruções, dentro do núcleo
4. cache L3 de dados e instruções, compartilhado entre núcleos
5. endereçamento virtual e memória virtual

Ver Seção 2.5.4 do documento *Intel® 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual, Order Number: 248966-033, June 2016*, disponibilizado.

O software implementado deverá conter:

1. Módulo de cache totalmente associativo (32 bits)
2. Módulo de cache associativo por conjuntos (32 bits)
3. Hierarquia de cache
4. Memória principal com endereçamento virtual e swap
5. Hierarquia de memória com cache e memória principal
6. Processador multinúcleo
7. Leitura de um arquivo com uma sequência de comandos (para testes)
8. Relatório Final

Cada um dos componentes é descrito a seguir. **Os nomes de funções, métodos ou tipos de dados apresentados nas descrições, EXATAMENTE COMO ESTÃO ESCRITOS NESTE DOCUMENTO, são obrigatórios.**

3.1 CACHE TOTALMENTE ASSOCIATIVO

Implementar uma função ou método

```
TACache createTACache(int c, int l);
```

onde `TACache` é o tipo de dado (struct ou classe) que representa uma cache totalmente associativa com capacidade total de `c` bytes, sendo `l` bytes por linha. É obrigatório que `c` e `l` sejam inteiros potências de 2 e que `c` seja um múltiplo de `l` (testar a correção da entrada e informar o erro, caso exista, é condição bônus).

Implementar também as seguintes funções ou métodos de acesso a informações sobre o `TACache`:

```
int getTACacheCapacity(TACache tac);
```

```
int getTACacheLineSize(TACache tac);
```

que retornam, respectivamente, a capacidade e o tamanho da linha da cache totalmente associativa `tac`.

Implementar a seguinte função ou método de acesso a dados da cache:

```
bool getTACacheData(TACache tac, int address, int * value);
```

que busca o valor do endereço `address` na cache totalmente associativa `tac`. O valor é retornado no parâmetro de saída `value` e o método ou função retorna `true`, se o endereço foi encontrado na cache (*hit*) ou `false`, senão (*miss*). A comparação do endereço `address` com o diretório do cache deve ser feita com o uso de operadores lógicos.

Implementar a seguinte função ou método de acesso a dados da cache:

```
void setTACacheLine(TACache tac, int address, int *line);
```

que escreve toda a linha `line`, que contém o endereço `address`, na cache totalmente associativa `tac`. O critério de seleção da linha do cache a ser gravada é de escolha do grupo, mas deve ser, no mínimo o critério FIFO discutido em aula. O tamanho da linha já é o tamanho definido na criação da `tac`.

Implementar a seguinte função ou método de acesso a dados da cache:

```
void bool setTACacheData(TACache tac, int address, int value);
```

que grava-sobrescreve o valor `value`, do endereço `address`, na cache totalmente associativa `tac`. O critério de seleção da linha do cache a ser gravada é de escolha do grupo, mas deve ser, no mínimo o critério FIFO discutido em aula. Se `address` não está na cache, a função retorna `false`. Se `address` está na cache, `value` deve ser escrita na posição correta (offset) da linha da cache. Nota: todo endereço, imediatamente após escrito, deverá constar em todos os níveis de cache, logo, antes de se escrever um valor na cache toda a linha que contém seu endereço deve ter sido copiada para a cache, ou seja, escrever em um endereço que nunca foi acessado significa chamar `setTACacheData`, receber `false` como resposta, chamar `setTACacheLine` para trazer toda a linha de dados e depois chamar `setTACacheData` novamente para atualizar o valor.

3.2 CACHE ASSOCIATIVO POR CONJUNTOS

Implementar uma função ou método

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

```
SACache createSACache(int c, int a, int l);
```

onde `SACache` é o tipo de dado (struct ou classe) que representa uma cache associativa por conjuntos com capacidade total de `c` bytes, associatividade `a` e `l` bytes por linha. É obrigatório que `c`, `a` e `l` sejam inteiros potências de 2 e que `c` seja um múltiplo de `a*l` (testar a corretude da entrada e informar o erro, caso exista, é condição bônus).

Cada conjunto da `SACache` deve ser uma `TACache` e, portanto, `createSACache` deve chamar `createTACache`.

Implementar também as seguintes funções ou métodos de acesso a informações sobre o `SACache`:

```
int getSACacheCapacity(SACache sac);
```

```
int getSACacheLineSize(SACache sac);
```

que retornam, respectivamente, a capacidade e o tamanho da linha da cache associativa por conjuntos `sac`.

Implementar a seguinte função ou método de acesso a dados da cache:

```
bool getSACacheData(SACache sac, int address, int * value);
```

que busca o valor do endereço `address` na cache associativa por conjuntos `sac`. O valor é retornado no parâmetro de saída `value` e o método ou função retorna `true`, se o endereço foi encontrado na cache (*hit*) ou `false`, senão (*miss*). A verificação dos bits de *lookup* do endereço `address` para extrair o número do conjunto deve ser feita com o uso de operadores lógicos.

Implementar a seguinte função ou método de acesso a dados da cache:

```
void setSACacheLine(SACache tac, int address, int *line);
```

que escreve toda a linha `line`, que contém o endereço `address`, na cache associativa por conjuntos `sac`, usando `setTACacheLine` da `TACache`.

Implementar a seguinte função ou método de acesso a dados da cache:

```
void bool setSACacheData(SACache sac, int address, int value);
```

que grava o valor `value`, do endereço `address`, na cache associativa por conjuntos `sac`, utilizando `setTACacheData` da `TACache`, e com o mesmo padrão de retorno de `setTACacheData`.

Implementar a função

```
SACache duplicateSACache(SACache sac);
```

que cria uma nova cache associativa por conjuntos com características idênticas a `sac`.

3.3 HIERARQUIA DE CACHE

Diferente do Core i7, deverá ser implementada uma cache inclusiva de três níveis no formato *write-through* (ver livro texto). A escrita de um dado significa escrevê-lo nos três níveis.

Implementar uma função ou método

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

```
Cache createCache(SACache l1d, SACache l1i, SACache l2, SACache l3,);
```

onde Cache é o tipo de dado (struct ou classe) que representa uma hierarquia de cache contendo uma cache L1 de dados l1d, uma cache L1 de instruções l1i, uma cache L2 de dados e instruções l2 e uma cache L3 compartilhada de dados e instruções l3. Para simplificar a manutenção da coerência de cache, consideramos que só poderá ser criada a hierarquia de cache se os tamanhos de linha de l1d ou de l1i forem menores ou iguais ao tamanho de linha de l2 e o tamanho de linha de l2 for menor que o tamanho de linha de l3.

Implementar as seguintes funções ou métodos de atualização dos dados ou instruções da cache (ver também Seção 3.4):

```
void fetchCacheData(Cache sac, MainMemory mmem, int address, int value);  
void fetchCacheInstruction(Cache sac, MainMemory mmem, int address, int value);
```

que busca na memória principal mmem toda a linha de cache correspondente ao endereço address para cada nível da hierarquia de cache c e atualiza toda a cache. Nota: cada nível pode ter um tamanho de linha diferente e é preciso manter a coerência do cache inclusivo.

Implementar as seguintes funções ou métodos de acesso a dados ou instruções da cache:

```
int getCacheData(Cache c, MainMemory mmem, int address, int * value);  
int getCacheInstruction(Cache c, MainMemory mmem, int address, int * value);
```

que busca o valor do endereço address na hierarquia de cache c. O valor é retornado no parâmetro de saída value e o método ou função retorna 1, se o endereço foi encontrado na cache L1 de dados; 2, se o endereço foi encontrado na cache L2, 3, se o endereço foi encontrado na cache L3 e ~~-4~~, se o dado não ~~está-estava~~ na cache (miss) e foi necessário atualizar a cache por meio das respectivas funções ou métodos fetchCacheData ou fetchCacheInstruction.

Implementar as seguintes funções ou métodos de acesso a dados ou instruções da cache:

```
void setCacheData(Cache sac, int address, int value);  
void setCacheInstruction(Cache sac, int address, int value);
```

que grava o valor value, do endereço address, na hierarquia de cache c.

Ao final de uma leitura ou escrita, o endereço acessado deve ter sido copiado para o cache L1 e deve ser mantida a coerência do cache inclusivo.

Implementar a função

```
Cache duplicateCache(Cache c);
```

que cria uma nova hierarquia de cache na qual L1 e L2 são duplicados por duplicateSACache a partir de c e L3 é a mesma de c (compartilhada).

3.4 MEMÓRIA PRINCIPAL

Implementar uma função ou método

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: 9 pt

Formatted: Font: 9 pt

Formatted: Font: 9 pt

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: 9 pt

Formatted: Font: 9 pt

Formatted: Font: 9 pt

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

```
MainMemory createMainMemory(int ramsize, int vmsize);
```

onde MainMemory é o tipo de dado (struct ou classe) que representa a memória principal, composta de memória RAM, com ramsize bytes, e memória virtual, com vmsize bytes. ~~A memória RAM deve ser implementada por um vetor de bytes e a memória virtual por outro vetor de bytes.~~

~~Devido à dificuldade adicional detectada na implementação da hierarquia de cache, neste trabalho não iremos implementar a segmentação paginada da memória principal. Portanto, a MainMemory deverá ser implementada simplesmente como um único vetor de tamanho ramsize + vmsize.~~

~~A MainMemory deve implementar o modelo de segmentação paginada, com swap entre os vetores, se necessário. Neste trabalho não consideraremos a possibilidade de um segmento estar fragmentado na memória. Porém, as operações de swap devem ser implementadas levando em conta o conceito de segmentação paginada (transferindo-se página a página) e utilizando-se única e exclusivamente a memória dos dois vetores (RAM e memória virtual) e nenhuma memória adicional do seu simulador de cache.~~

~~Implementar a seguinte função ou método de alocação de memória:~~

```
int allocSegment(MainMemory mem, int id, int size);
```

~~que aloca um segmento de memória de size bytes, identificado por id, na memória mem. O segmento deve ser obrigatoriamente alocado na memória RAM. Se houver espaço contíguo livre na memória RAM, o segmento é alocado e a função ou método retorna 0; se não houver espaço livre na memória RAM, é liberado espaço contíguo na RAM por meio de um swap, o segmento é alocado e a função ou método retorna 1; se não houver espaço livre nem na memória RAM nem na virtual, o segmento não é alocado e a função ou método retorna -1.~~

~~A implementação da memória principal deve conter, além dos vetores que representam a memória RAM e a memória virtual, uma estrutura de dados que implemente o endereçamento virtual, com as informações de:~~

- ~~1. Endereço inicial e tamanho de cada segmento no endereçamento virtual~~
- ~~2. Mapeamento do endereço virtual inicial de cada página para o endereço real da página na memória física~~

~~A estrutura de dados de mapeamento pode ser implementada com a memória do seu simulador, para simplificar. A opção de implementação é criar uma lista duplamente ligada de segmentos. Veja um exemplo em C, para uma memória principal (endereçamento virtual) de 128MB seria criar a memória com um único segmento livre, na forma:~~

```
struct segment {  
    int id;  
    int isFree;  
    int addr;  
    int size;  
    Segment next;  
    Segment prev;  
};  
typedef struct *segment Segment;  
Segment *segmentos;
```

~~Inicialmente o vetor segmentos teria apenas um segmento livre, do tamanho total da memória:~~

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

Formatted: Font: (Default) Courier New

```

Segment segm = (Segment) malloc(sizeof struct segment);
segm->id = 0;
segm->isFree = 1;
segm->addr = 0;
segm->size = 128*1024*1024;
segm->next = NULL;
segm->prev = NULL;

```

A função ou método `allocSegment` irá buscar no vetor o primeiro segmento livre com tamanho maior do que o novo segmento que precisa ser alocado e reduz o tamanho do segmento livre.

```

Segment newsegm = (Segment) malloc(sizeof struct segment);
newsegm->id = id;
newsegm->isFree = 0;
newsegm->addr = segm->addr;
newsegm->size = size;
newsegm->next = segm;
newsegm->prev = segm->prev;
segm->addr = segm->addr + size;
segm->size -= size;
segm->prev = newsegm;

```

Trata-se apenas de um exemplo. A implementação é de escolha do grupo.

Fica a critério do grupo a definição da estratégia de seleção do segmento que deve ser enviado da memória RAM para a memória virtual em caso de necessidade de *swap*.

Implementar a seguinte função ou método de liberação de memória:

```

——— int freeSegment(MainMemory mem, int id);

```

que libera o segmento identificado por `id`. A liberação pode ser simplesmente a modificação da *flag* `isFree`, no exemplo acima, mas neste caso há de se tomar cuidado com a criação de sequências de segmentos livres para as operações que seguem.

Implementar a seguinte função ou método de acesso a dados ou instruções (a memória principal não separa dados de instruções) da memória principal:

```

int getMainMemoryData(MainMemory mem, int address, int * value);

```

que busca o valor do endereço `address` na memória principal `mem`. O valor deve sempre ser lido da memória RAM. Se o endereço virtual `address` estiver mapeado para um endereço real na memória virtual, deve ser feito o *swap* antes da leitura do valor. O valor é retornado no parâmetro de saída `value`. O método ou função retorna 4, se o endereço é válido (pertence a um segmento não livre) e foi lido corretamente da memória RAM, sem necessidade de *swap*; 5, se o endereço é válido (pertence a um segmento não livre) e foi lido corretamente da memória RAM, após um *swap*; -1, se o endereço está fora da faixa de endereços virtuais válidos; -2, se o endereço está dentro da faixa de endereços virtuais válidos mas pertence a um segmento não alocado (livre).

Implementar a seguinte função ou método de acesso a dados da memória principal:

```

void setMainMemoryData(MainMemory mem, int address, int value);

```

que grava o valor do endereço `address` na memória principal `mem`. ~~O valor deve sempre ser escrito na memória RAM. Se o endereço virtual `address` estiver mapeado para um endereço real na memória virtual, deve ser feito o `swap` antes da escrita do valor.~~ O método ou função retorna 4, se o endereço é válido (pertence a um segmento não livre) e o dado foi escrito corretamente na memória RAM, ~~sem necessidade de `swap`; 5, se o endereço é válido (pertence a um segmento não livre) e o dado foi escrito corretamente na memória RAM, após um `swap`; -1, se o endereço está fora da faixa de endereços virtuais válidos; -2, se o endereço está dentro da faixa de endereços virtuais válidos mas pertence a um segmento não alocado (livre).~~

3.5 HIERARQUIA DE MEMÓRIA

Implementar uma função ou método

```
Memory createMemory(Cache c, MainMemory mem);
```

onde `Memory` é o tipo de dado (struct ou classe) que representa a hierarquia de memória, composta de uma hierarquia de cache `c` e uma memória principal `mem`.

Implementar as seguintes funções ou métodos de acesso a dados ou instruções da memória:

```
int getData(Memory mem, int address, int * value);

int getInstruction(Memory mem, int address, int * value);
```

que busca o valor do endereço `address` na hierarquia de memória `mem`. O valor é retornado no parâmetro de saída `value`. O método ou função retorna 1, se o endereço foi lido em L1; 2, se o endereço foi lido em L2; 3, se o endereço foi lido em L3; 4, se o endereço foi lido na memória principal RAM, sem necessidade de `swap`; 5, se o endereço foi lido na RAM, após um `swap`; -1, se o endereço está fora da faixa de endereços virtuais válidos; -2, se o endereço está dentro da faixa de endereços virtuais válidos mas pertence a um segmento não alocado (livre).

Implementar as seguintes funções ou métodos de acesso a dados ou instruções da memória:

```
void setData(Memory mem, int address, int value);

void setInstruction(Memory mem, int address, int value);
```

que grava o valor do endereço `address` na hierarquia de memória `mem`. A escrita deve respeitar os critérios de escrita da cache e da memória principal que compõem a hierarquia de memória `mem`.

Implementar a função

```
Memory duplicateMemory(Memory mem);
```

que cria uma nova hierarquia de memória na qual a hierarquia de cache é duplicada por `duplicateCache` (L1 e L2 duplicados e L3 compartilhado) e a memória principal é a mesma de `mem`.

3.6 PROCESSADOR MULTINÚCLEO

Implementar uma função ou método

```
Processor createProcessor(Memory mem, int ncores);
```

onde `Processor` é o tipo de dado (struct ou classe) que representa o processador, composta de `ncores` núcleos, todos usando a hierarquia de memória `mem` ou suas duplicações. **Lembre-se que as**

caches L1 e L2 são exclusivas de cada núcleo. Portanto, o primeiro núcleo pode fazer referência exatamente a `mem`, mas cada núcleo adicional deve criar uma nova `Memory` com `duplicateMemory`.

3.7 LEITURA DE ARQUIVO DE COMANDOS

O programa criado deve ser inicializado passando-se como parâmetro um arquivo de comandos (ex: `meuprograma comandos.txt`). O programa irá ler e executar cada comando sequencialmente, **imprimindo na tela uma mensagem para cada comando executado**, com a informação do comando executado e o resultado obtido. Ao final, emitirá um relatório geral da execução de todos os comandos (ver próxima seção) e terminará.

Esta seção explica o formato do arquivo e os comandos que devem ser interpretados. A opção pelo arquivo de comandos permite que cada grupo utilize a linguagem de programação que desejar.

O arquivo é do tipo texto com um comando por linha.

Todos os comandos são no formato “*comando par1 par2*”, podendo o número de parâmetros variar conforme o comando. Os comandos que devem ser implementados são listados a seguir. A verificação de corretude do arquivo é condição de bônus.

Comandos de criação da hierarquia de memória:

1. `cl1d c a l`. Cria uma variável `l1d` que é uma cache associativa por conjuntos com capacidade `c`, associatividade `a` e `l` bytes por linha.
2. `cl1i c a l`. Cria uma variável `l1i` que é uma cache associativa por conjuntos com capacidade `c`, associatividade `a` e `l` bytes por linha.
3. `cl2 c a l`. Cria uma variável `l2` que é uma cache associativa por conjuntos com capacidade `c`, associatividade `a` e `l` bytes por linha.
4. `cl3 c a l`. Cria uma variável `l3` que é uma cache associativa por conjuntos com capacidade `c`, associatividade `a` e `l` bytes por linha.
5. `cmp ramsize vmsize`. Cria uma variável `mp` que é uma memória principal com `ramsize` bytes de RAM e `vmsize` bytes de memória virtual.
6. `cmem`. Cria uma variável `mem` que é uma hierarquia de memória criada com `l1d`, `l1i`, `l2`, `l3` e `mp` já criados anteriormente.
7. `cp n`. Cria um processador com `n` núcleos, sendo que cada núcleo terá uma hierarquia de memória baseada em `mem`.

Todos os comandos de criação devem ser executados na ordem acima antes que qualquer outro comando possa ser executado.

Comandos de alocação de memória:

- ~~1. `ls id size`. Aloca um segmento de tamanho `size`, identificado por `id`.~~
- ~~2. `fs id`. Libera o segmento identificado por `id`.~~

Comandos de acesso a dados e instruções:

1. `ri n addr`. Lê a instrução de endereço `addr` na hierarquia de memória do núcleo `n`.
2. `wi n addr value`. Escreve a instrução `value` no endereço `addr` pela hierarquia de memória do núcleo `n`.
3. `rd n addr`. Lê o dado de endereço `addr` na hierarquia de memória do núcleo `n`.

4. `wd n addr value`. Escreve o dado `value` no endereço `addr` pela hierarquia de memória do núcleo `n`.
5. `asserti n addr level value`. Lê a instrução de endereço `addr` na hierarquia de memória do núcleo `n` e verifica se o valor foi lido do nível `level` (variando de 1 a 5 conforme retorno de `getInstruction`) e o valor lido é igual a `value`.
6. `assertd n addr level value`. Lê o dado de endereço `addr` na hierarquia de memória do núcleo `n` e verifica se o valor foi lido do nível `level` (variando de 1 a 5 conforme retorno de `getData`) e o valor lido é igual a `value`.

3.8 RELATÓRIO FINAL

O programa deve ler um arquivo com uma sequência de comandos de usuário e emitir um relatório final contendo as seguintes informações:

1. Descrição de toda a hierarquia de memória, com dados de capacidade, associatividade e tamanho de linhas de cada nível de cache, tamanho da memória RAM e da memória virtual, além do tamanho das páginas.
2. Número total de *hits* para cada nível (variando de 1 a ~~5~~4, conforme retorno de `getData`).
3. Número total de erros (dos tipos -1 ~~ou~~ -2 conforme retorno de `getData`).

4 AVALIAÇÃO

O trabalho vale 30 pontos. Cada um dos itens da Seção 3 são pontuados individualmente.

Pontuação bônus será obtida nos seguintes casos:

1. Verificação de corretude dos parâmetros de `createTACache`
2. Verificação de corretude dos parâmetros de `createSACache`
3. Verificação de corretude dos comandos do arquivo de comandos