

Guía de ejercicios # 11 - Jerarquía de memoria

Organización de Computadoras 2018

UNQ

Objetivos

Que el estudiante pueda:

- Conocer y comprender la jerarquía de memorias
- Comprender la necesidad de una memoria Cache
- Analizar como funcionan las correspondencias de memoria cache
- Entender cual es el impacto del desempeño de una cache

Los ejercicios marcados con ★ forman un conjunto minimal para aprender e integrar los conceptos **con el tiempo disponible en clase**.

Para resolver esta práctica se aconseja consultar los apuntes de la materia *Subsistema de Memoria y Memoria Caché*, disponibles ambos en <http://orga.blog.unq.edu.ar/descargas/>.

1 Correspondencia Directa

En una caché con correspondencia directa las celdas se almacenan en una línea predeterminada, es decir que cada bloque, si debe ser cacheado, está destinado a una línea específica.

1. ★ ¿Cómo se divide una dirección de memoria de 5 bits en *tag*, *línea* y *palabra* si se tiene una memoria principal de 32 celdas de un byte y una memoria caché con bloques de 4 celdas y 4 líneas
2. Considerar una computadora con una memoria de 64 celdas de un byte y una memoria cache con 4 líneas y bloques de 8 celdas por línea. Dada una dirección de memoria calcular la cantidad de bits que se destinan a: *tag*, *línea* y *palabra*.
3. ★ Considerando el escenario del ejercicio 2, dar los tags y las líneas de la cache en las que se almacenan las direcciones:

Dirección	Tag	Nro. línea
111000		
011001		
111111		
101000		
101001		

4. Considerando el escenario del ejercicio 2, listar todas las direcciones en la misma línea que la dirección 111000.

5. ★ Suponer que la cache descrita en el ejercicio 2 está vacía, y que se realizan lecturas de direcciones en el siguiente orden. Determinar para cada lectura si ésta produjo un fallo o un acierto.

Dirección	Tag	Nro. línea	¿F/A?
111000			
011001			
011111			
011101			
111111			
111000			
101000			
101001			

6. ¿Cómo se divide una dirección de memoria de 16 bits en *tag*, *línea* y *palabra* si la memoria caché con tiene 4 celdas por bloque y 256 líneas? ¿Cómo se decide si la dirección FA32 está en caché?
7. ★ Considerar una máquina Q con una memoria cache de mapeo directo de sólo 2 líneas, con capacidad cada una para almacenar un bloque de 4 celdas. A partir de la posición 0000 está ensamblado el siguiente programa. El PC comienza en la etiqueta `main` y la caché está inicialmente vacía.

```
main: MOV R7, 0x0005 ; iniciar el contador
      MOV R6, 0x0001 ; iniciar el acumulador
arriba: MUL R6, 0x0002
      SUB R7, 0x0001;
      JNE arriba
```

Completar la siguiente tabla

Dirección	Tag	Nro. línea	Palabra	¿F/A?

8. ★ Cuantos bits de una dirección se destinan a: *tag*, *línea* y *palabra* en el siguiente esquema:
 - Una memoria principal de 64 Kbytes, con celdas de un byte
 - Una memoria cache con:
 - (a) Bloques de 8 celdas
 - (b) 256 Bytes de capacidad para datos (sin contar tag)
 - (c) correspondencia directa

9. ★ Considerar la arquitectura del ejercicio 8:

- Dar las líneas en las que se almacenan las direcciones: 111B, C334, D01D, AAAA.
- Listar todas las direcciones que se almacenarán en el mismo bloque que la dirección 1A1A.
- Suponer que la cache está vacía para completar la siguiente tabla con una secuencia de lecturas:

Dirección	Tag	Nro. línea	Palabra	¿F/A?
111B				
1100				
C334				
D01D				
AAAA				
1118				
D01A				

10. Para los siguientes programas, asumir que se ejecutan en una máquina de arquitectura **Q**, con una memoria cache de bloques de 4 celdas y 4 líneas. Para cada uno calcular la cantidad de accesos a memoria caché y a memoria principal se llevan a cabo durante su ejecución.

```
{a}      MOV R0, 0x0000
          MOV R1, 0x0000
          MOV R2, 0x0000
          MOV R3, 0x0000
          MOV R4, 0x0000
          MOV R5, 0x0000
          MOV R6, 0x0000
          MOV R7, 0x0000
arriba:  ADD R0, 0x0001
          ADD R1, 0x0001
          ADD R2, 0x0001
          ADD R3, 0x0001
          ADD R4, 0x0001
          ADD R5, 0x0001
          ADD R6, 0x0001
          ADD R7, 0x0001
          CMP R7, 0x000F
          JNE arriba
```

- {b} El siguiente programa está ensamblado a partir de la celda A012:

```
          MOV R0, 0xAAAA
arriba:  MOV R1, 0x0004
          CALL shiftN
          CMP R0, 0x0000
          JNE arriba
```

y la siguiente rutina ensamblada a partir de la celda B012

```
shiftN:  CMP R1, 0x0000
          JE salir
          DIV R0, 0x0002
          SUB R1, 0x0001
          JMP shiftN
salir:   RET
```

2 Correspondencia asociativa

En una **correspondencia asociativa** el contenido de cada celda leída se **asocia** a un **tag** que identifica su origen, es decir, su dirección de memoria principal. Esto permite que las celdas puedan ser almacenadas en cualquier línea, por lo que se debe chequear en todas ellas si alguna contiene la dirección buscada como tag.

Ejercicios

Todos los ejercicios tienen una memoria caché con **correspondencia asociativa**

- ★ Suponer una memoria principal de 32 celdas de un byte y una memoria caché con 4 líneas y capacidad de almacenar 1 celda en cada línea.
 - ¿Qué tamaño tiene el tag?
 - ¿Qué capacidad total tiene la caché?
- Suponer una memoria principal de 32 celdas de un byte y una memoria caché con 4 líneas y capacidad de almacenar **4 celdas** en cada línea.
 - ¿Qué tamaño tiene el tag?
 - ¿Qué capacidad total tiene la caché?
- ★ Suponer que una caché que tiene el siguiente contenido:

00	345	00112233445566778899AABBCCDDEEFF
01	346	FFEEDDCCBBA99887766554433221100
10	347	00112233445566778899AABBCCDDEEFF
11	348	FFEEDDCCBBA99887766554433221100

 - Si las direcciones de memoria tienen 16 bits y el tag es de 12 bits entonces hay 4 bits que se usan para distinguir la palabra. ¿Cuántas palabras entran en un bloque?
 - ¿Está cacheada la celda 3451?
 - ¿Qué valor retorna la caché para esa celda?
- ★ Suponer una memoria principal con direcciones de 16 bits y una memoria caché con 256 líneas y capacidad de almacenar **4 celdas** en cada línea. Si la CPU pide la lectura de la celda FA32, ¿Que tag se debe buscar en la caché?
- Cuántos bits de una dirección se destinan a: *tag* y *palabra* en el siguiente esquema:
 - Una memoria principal de 256 celdas:
 - Una memoria cache con:
 - Bloques de 4 celdas
 - 8 líneas
 - correspondencia asociativa
- ★ Cuántos bits de una dirección se destinan a: *tag* y *palabra* en el siguiente esquema:

- Una memoria principal de 65536 celdas
 - Una memoria cache con:
 - (a) Bloques de 16 celdas
 - (b) 16 líneas
 - (c) correspondencia asociativa
17. El chip 80286 (fabricado entre 1982 y 1993) tenía un bus de datos de 16 bits, pero un bus de direcciones de 24 bits, lo que lo hacía la primera arquitectura de Intel capaz de soportar 16Mb de RAM. Suponer la siguiente memoria cache, adaptada a dicha arquitectura:
- (a) 32 celdas por bloque
 - (b) 256 líneas
 - (c) correspondencia asociativa

Determinar:

- (a) ¿Cómo se divide una dirección de memoria en *tag* y *palabra*?
- (b) ¿Cómo se decide si la dirección FAFABA está en caché?
- (c) ¿Cuántas celdas contiene dicha memoria cache?

3 Correspondencia asociativa por conjuntos

Esta correspondencia combina aspectos de las dos anteriores. Las líneas se agrupan en conjuntos para corresponder de manera directa cada bloque de memoria principal con un conjunto dentro de la caché, y dentro de cada conjunto los bloques se almacenan con un criterio asociativo. Dicho de otra forma, las celdas de memoria tendrán un único conjunto en el que pueden almacenarse y dentro de ese conjunto, pueden ir a cualquier línea.

Ejercicios

18. Cuantos bits de una dirección se destinan a: *tag*, *conjunto* y *palabra* en el siguiente esquema:
- Una memoria principal de 32 celdas de un byte
 - Una memoria cache con:
 - (a) Bloques de 4 celdas
 - (b) 4 líneas
 - (c) correspondencia asociativa por conjuntos, conjuntos de 2 líneas
19. ★Cuantos bits de una dirección se destinan a: *tag*, *conjunto* y *palabra* en el siguiente esquema:
- Una memoria principal con celdas de un byte y direcciones de 16 bits
 - Una memoria cache con:

- (a) Bloques de 4 celdas
- (b) 8 conjuntos de 4 líneas

20. ★Cuantos bits de una dirección se destinan a: *tag*, *conjunto* y *palabra* en el siguiente esquema:

- Una memoria principal de una máquina **Q**
- Una memoria cache con:
 - (a) 1024 líneas
 - (b) Conjuntos de 4 líneas
 - (c) Capacidad de almacenar 16KB

4 Desempeño (performance) de la caché

Suponer una máquina con arquitectura **Q6** con una memoria caché de correspondencia directa de 64 líneas y 4 celdas por bloque. Se tiene el siguiente programa ensamblado a partir de la celda B110 y se sabe que R1 = AC00, R3 = A702, SP=FFEE y que la celda A702 tiene el valor 1.

```

B110      CMP [R3], 0x0000
B112      JE fin
B113      ADD R0, [R1]
B114      ADD R2, [R3]
B115      fin: RET

```

Se necesita analizar la performance de la caché en cuanto a la cantidad de fallos que se producen durante la ejecución del programa.

dir(hexa)	dir (binario)	tag	línea	F/A
B110	1011000100010000	10110001	000100	F
B111	1011000100010001	10110001	000100	A
B112	1011000100010010	10110001	000100	A
B113	1011000100010011	10110001	000100	A
AC00	1010110000000000	10101100	000000	F
B114	1011000100010100	10110001	000101	F
A702	1010011100000010	10100111	000000	F
B115	1011000100010101	10110001	000101	A

Se produjeron 8 accesos, de los cuales 4 fueron fallos, es decir que se tiene una **tasa de fallos** de $\frac{4}{8} = 0,5$.

Si el tiempo de acceso a la memoria es de $0,5ms$ y el de la cache es $0,05ms$, se sabe que la ejecución de ese programa llevó en total

$$4 * (0,5ms + 0,05ms) + 4 * 0,05ms$$

Ejercicios

21. Calcular la tasa de fallos se produjo en las ejecuciones del ejercicio 10. ¿Cómo pueden disminuirse los fallos?
22. Se tiene un sistema con una memoria principal con un tiempo de acceso de 3s, y una memoria caché cuyo tiempo de acceso es de 0,3s y cuya tasa de aciertos es del 90%. ¿Cuánto tiempo se tarda en leer 2000 celdas?

23. Se dispone de una arquitectura como la del ejercicio 8. Se sabe además que cada línea tiene 8 bytes (que además es el tamaño de la palabra de esta máquina). En la memoria de esta computadora está cargado a partir de la posición 0x0000 un arreglo de números de 8 bytes, con un largo total de 256 números. El siguiente programa suma algunos de los números del arreglo, tarea que repite 1000 veces. El PC comienza en la etiqueta `main`.

```
main:      MOV R7, 0x0000    //con R7 se cuentan las 1000
           pasadas
           MOV R3, 0x0080 //en R3 se guarda el 'salto'
comienzo: MOV R0, 0x0000    //con R0 se recorre el arreglo
           MOV R1, 0x0000 //en R1 se acumula la suma
loop:     ADD R1, [R0]     //se suma en R1 la posición actual
           ADD R0, R3     //se avanza R0
           CMP R0, 0x0800 //fin del arreglo (256*8 = 0x800)
           JL loop       //si no se termino el arreglo, sigo
           ADD R7, 0x0001
           CMP R7, 0x03EE //fin de las pasadas
           JNE comienzo //si no hice 1000 pasadas, sigo
           RET
```

- (a) Dar la tasa de fallos que se produce en la caché (inicialmente vacía), considerando **únicamente los accesos al arreglo** (y no a las instrucciones).
- (b) Dar la tasa de fallos bajo las mismas condiciones del ítem anterior, pero modificando el valor que se carga en R3 a 0x88 (el salto es ahora de 17 posiciones, dado que $17*8 = 136 = 0x88$).
- (c) ¿Qué diferencia se observa entre los casos anteriores? ¿A qué se debe?

24. Analizar el programa del Ejercicio 23, pero con una cache asociativa (con las mismas características: 256B de datos, con un tamaño de línea de 8B). ¿Cuál es ahora la tasa de fallos para los ítems a) y b)? ¿Cuál es entonces la ventaja de una cache de mapeo directo?

25. Considerar una maquina con una memoria cache de correspondencia directa de 1024 lineas, un tamaño de bloque de 4 bytes y una memoria principal de 64 KBytes con celdas de un byte.

- (a) Dada una dirección de memoria calcular la cantidad de bits que se destinan a: *tag*, *línea* y *palabra*.
- (b) Suponer que la cache esta vacía, y que se realizan lecturas de datos cuyas direcciones están en el siguiente orden:

```
0xEA00
0xEA01
0x9A03
0xEA02
0xEA04
0xEA05
0xEA07
0xEA04
```

Determinar para cada lectura si esta produjo un fallo o un acierto.

(c) Sabiendo que el tiempo de acceso a la memoria ram es de $0,5\mu s$, calcular el tiempo máximo de acceso a la cache para que el tiempo total de los accesos sea inferior a los $2,4\mu s$.

26. Dado el siguiente programa:

```
ciclo: CMP [R0], 0x0000
       JE fin
       SUB [R0], 0x0001
       JMP ciclo
fin:   ADD [R0], 0x0001
```

- (a) Ensamblar el programa
- (b) Sabiendo que $R0 = C000$, que en la celda C000 hay almacenado un 2, que el programa se encuentra ensamblado a partir de la celda 7001 y el sistema tiene una cache de mapeo directo de 8 celdas por bloque y una capacidad de 2KB, inicialmente vacía. Completar para la ejecución del programa la siguiente tabla:

Dirección	Tag	Línea	Palabra	F/A	Desaloja?

5 Ejercicios integradores

27. Suponga la siguiente secuencia de accesos a memoria, considerando una cache de mapeo directo de 16 celdas por bloque y 16 lineas:

```
AB0C, AB0D, 9901, 9902, AB0E, AB0F, AB0F, AB0E
```

- (a) Indique, para cada acceso, si ocurre un fallo o un acierto, y que principio de localidad (temporal o espacial) se manifiesta.
- (b) ¿Cómo afecta a la tasa de aciertos si se la cambia por una cache asociativa?

28. HTTP es el protocolo que se utiliza para navegar en Internet. Existe algo llamado HTTP cache. Averiguar qué es. ¿Qué parecido tiene con el cache del procesador?

29. ¿Que significa “cachear” una celda de memoria? ¿Es posible que un programa funcione mejor sin memoria cache que con cache?

30. La memoria caché es una memoria asociativa ¿Por qué? (Notar que no hablamos de mapeo asociativo).

References

[1] Williams Stallings, *Computer Organization and Architecture*, octava edición, Editorial Prentice Hall, 2010. **Capítulo 4**