

03 - Hierarquia da Memória: Conceitos Fundamentais e Desempenho

Arquitectura de Computadores
Mestrado Integrado em Engenharia Informática

Luís Paulo Santos

Material de apoio (mesmo que para 04 – Hierarquia da Memória: Organização)

- *“Computer Organization and Design: The Hardware / Software Interface”*
David A. Patterson, John L. Hennessy; 5th Edition, 2013
 - Secção 5.1 (pags. 372 .. 378) – Introduction
 - Secção 5.3 + 5.4 (pags. 383 .. 418) – The Basics of Caches + Performance
 - Secção 5.8 (pags. 454 .. 461) – A Common Framework for Memory Hierarchy
 - Secção 5.13 (pags. 471 .. 475) – Real Stuff: ARM Cortex-A8 and Intel Core i7
- *“Computer Systems: a Programmer's Perspective”*; Randal E. Bryant, David R. O'Hallaron--Pearson (2nd ed., 2011)
 - Secção 1.5 + 1.6 (pags. 12 .. 14) – Introduction
 - Capítulo 6 (pag. 560) – Preâmbulo
 - Secção 6.2 .. 6.7 (pags. 586 .. 630)

Hiato Processador-Memória



Para cada instrução:

- 1.Ler instrução
- 2.Ler operando
- 3.Escrever Resultado

Hiato Processador-Memória



Suponhamos um processador a executar um programa que consiste numa longa sequência de instruções inteiras:

```
addl reg, [Mem]
```

Se a instrução tiver 8 bytes de tamanho e cada inteiro 4 bytes a execução destas instruções implica um movimento de $8 + 2 * 4 = 16$ bytes.

Se frequência = 2.5 GHz e o CPI=1 então são executadas $2.5 * 10^9$ inst/seg
A largura de banda necessária para manter o processador alimentado é de:

$$2.5 * 10^9 * 16 = \mathbf{40 \text{ GB/s}}$$

Hiato Processador-Memória



Standard name (single channel)	Peak transfer rate
DDR2-400	3.2 GB/s
DDR2-800	6.4 GB/s
DDR3-1066	8.533 GB/s
DDR3-2133	17.067 GB/s
DDR4-1600	12.8 GB/s
DDR4-3200	25.6 GB/s
DDR5-xxxx	Ano 2020

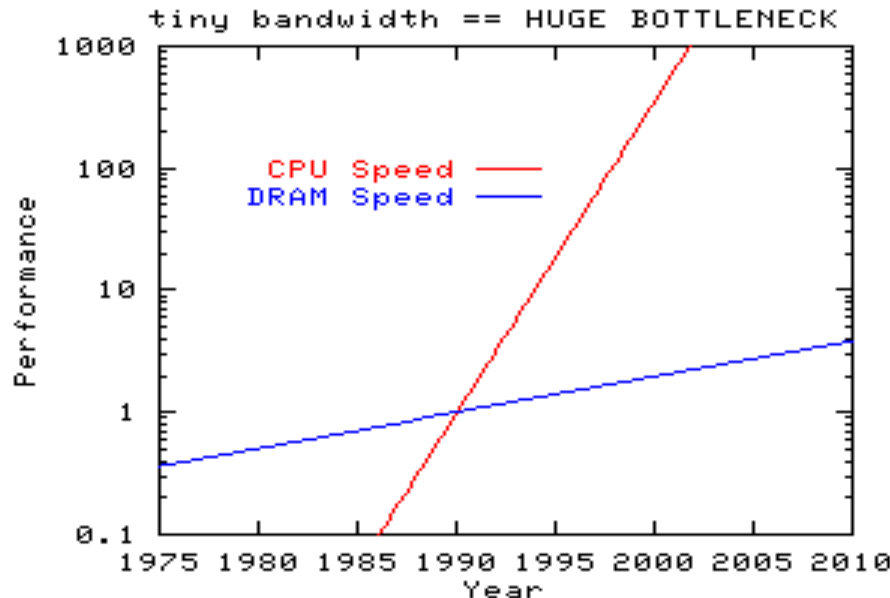
Largura de banda exigida neste exemplo: $2.5 \times 10^9 \times 16 = \mathbf{40\ GB/s}$

Hiato processador-memória:

“A memória é incapaz de alimentar o processador com instruções e dados a uma taxa suficiente para o manter constantemente ocupado”

Hiato Processador-Memória

- O desempenho dos micro-processadores tem vindo a aumentar a uma taxa de cerca de 60% ao ano.
- O desempenho das memórias tem vindo a aumentar a uma taxa de perto de 10% ao ano [1,2]



The STREAM benchmark

<http://www.cs.virginia.edu/stream/ref.html>

[1] "The Processor-Memory bottleneck: Problems and Solutions."; Nihar R. Mahapatra and Balakrishna Venkatrao, ACM
(<http://www.acm.org/crossroads/xrds5-3/pmgap.html>)

[2] "The Memory Gap and the Future of High Performance Memories"; Maurice V. Wilkes, ACM
(<http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/pub/docs/URL/tr.2001.4.pdf>)

Hiato Processador-Memória

- As diferentes taxas de aumento do desempenho destes dois componentes essenciais levam a um aumento do hiato Processador-Memória (*“the memory gap”*) com o tempo
 - Em 1990 um acesso à memória central custava entre 8 a 32 ciclos do relógio
 - Em 2000 custava, numa estação Alpha 21264 667 MHz, cerca de 128 ciclos
 - O custo de cada acesso (medido em ciclos) tende a duplicar cada vez que o desempenho dos processadores duplica [2], isto é, cada período de [1,5 .. 2] anos
- O hiato processador-memória é um dos principais obstáculos à melhoria do desempenho dos sistemas de computação

Hiato Processador-Memória

- Dynamic RAM (DRAM)
 - 1 condensador +1 transistor por *bit*
 - (alta densidade -> alta capacidade e baixo custo relativo)
 - Não persistente, *refresh* periódico (-> tempos de acesso elevados)
- Static RAM (SRAM)
 - 6 transistores por *bit* (baixa densidade)
 - (baixa densidade -> menor capacidade e alto custo relativo)
 - Muito persistente: *bistable* (-> tempos de acesso reduzidos)

	Transistors per bit	Relative access time	Persistent?	Sensitive?	Relative cost
SRAM	6	1×	Yes	No	100×
DRAM	1	10×	No	Yes	1×

[Computers Systems: A Programmers' Perspective; Bryant & Hallaron; Pearson, 2nd ed.; 2011]

Hiato Processador-Memória

Metric	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2010:1980
\$/MB	19,200	2900	320	256	100	75	60	320
Access (ns)	300	150	35	15	3	2	1.5	200

(a) SRAM trends

Metric	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2010:1980
\$/MB	8000	880	100	30	1	.1	0.06	130,000
Access (ns)	375	200	100	70	60	50	40	9
Typical size (MB)	0.064	0.256	4	16	64	2000	8,000	125,000

(b) DRAM trends

Metric	1980	1985	1990	1995	2000	2003	2005	2010	2010:1980
Intel CPU	8080	80286	80386	Pent.	P-III	Pent. 4	Core 2	Core i7	—
Clock rate (MHz)	1	6	20	150	600	3300	2000	2500	2500
Cycle time (ns)	1000	166	50	6	1.6	0.30	0.50	0.4	2500
Cores	1	1	1	1	1	1	2	4	4
Eff. cycle time (ns)	1000	166	50	6	1.6	0.30	0.25	0.10	10,000

(d) CPU trends

[Computers Systems: A Programmers' Perspective; Bryant & Hallaron; Pearson, 2nd ed.; 2011]

Hiato Processador-Memória

Memory technology	Typical access time	\$ per GiB in 2012
SRAM semiconductor memory	0.5–2.5 ns	\$500–\$1000
DRAM semiconductor memory	50–70 ns	\$10–\$20
Flash semiconductor memory	5,000–50,000 ns	\$0.75–\$1.00
Magnetic disk	5,000,000–20,000,000 ns	\$0.05–\$0.10

[PATTERSON & HENESSY; COMPUTER ORGANIZATION AND DESIGN: THE HARDWARE / SOFTWARE INTERFACE; MORGAN KAUFMANN, 5TH EDITION, 2013]

Localidade

princípio da localidade:

“Os programas bem escritos tendem a aceder a dados que estão próximos (em termos de endereço de memória) de outros dados acedidos recentemente, bem como a referenciar repetidamente os mesmos dados.”

consequência:

num determinado período de tempo os acessos à memória concentram-se num subconjunto bem localizado do espaço de endereçamento.

O **princípio da localidade** divide-se em 2 componentes:

- **Localidade temporal**
- **Localidade espacial**

Localidade Temporal

Localidade Temporal – um elemento de memória acedido pelo CPU será, com grande probabilidade, acedido de novo num futuro próximo.

Exemplos: tanto as instruções dentro dos ciclos, como as variáveis usadas como contadores de ciclos, são acedidas repetidamente em curtos intervalos de tempo.

```
for (i=0 ; i< N ; i++)  
    a[i] += i;
```

Quais os elementos (código e variáveis) deste programa que exibem boa localidade temporal?

Localidade Espacial

Localidade Espacial – se um elemento de memória é acedido pelo CPU, então elementos com endereços na proximidade serão, com grande probabilidade, acedidos num futuro próximo.

Exemplos: as instruções são acedidas em sequência, assim como, na maior parte dos programas os elementos dos *arrays*.

```
for (i=0 ; i< N ; i++)  
    a[i] += i;
```

Quais os elementos (código e variáveis) deste programa que exibem boa localidade temporal?

Localidade

C: os elementos de um vector multidimensional são armazenados *row-wise*

```
int a[3][4];
```

0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44
a[0][0]	a[0][1]	a[0][2]	a[0][3]	a[1][0]	a[1][1]	a[1][2]	a[1][3]	a[2][0]	a[2][1]	a[2][2]	a[2][3]

```
for (j=0 ; j< 4 ; j++)  
    for (i=0 ; i< 3 ; i++)  
        a[i][j]++;
```

Localidade

C: os elementos de um vector multidimensional são armazenados *row-wise*

```
int a[3][4];
```

0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44
a[0][0]	a[0][1]	a[0][2]	a[0][3]	a[1][0]	a[1][1]	a[1][2]	a[1][3]	a[2][0]	a[2][1]	a[2][2]	a[2][3]

```
for (i=0 ; i< 3 ; i++)  
    for (j=0 ; j< 4 ; j++)  
        a[i][j]++;
```

Hierarquia de Memória: Tecnologia e Localidade

- Tecnologia das memórias:
 - Diferentes tecnologias têm tempos de acesso muito diferentes;
 - Tecnologias mais rápidas; menos capacidade e mais caras que as mais lentas
 - O hiato CPU vs. memória tem aumentado e tende a aumentar
- Software
 - Programas bem escritos exibem boa localidade, isto é, tendem a concentrar os seus acessos a um subconjunto do espaço de endereçamento e a aceder repetidamente aos mesmos endereços

Hierarquia de Memória

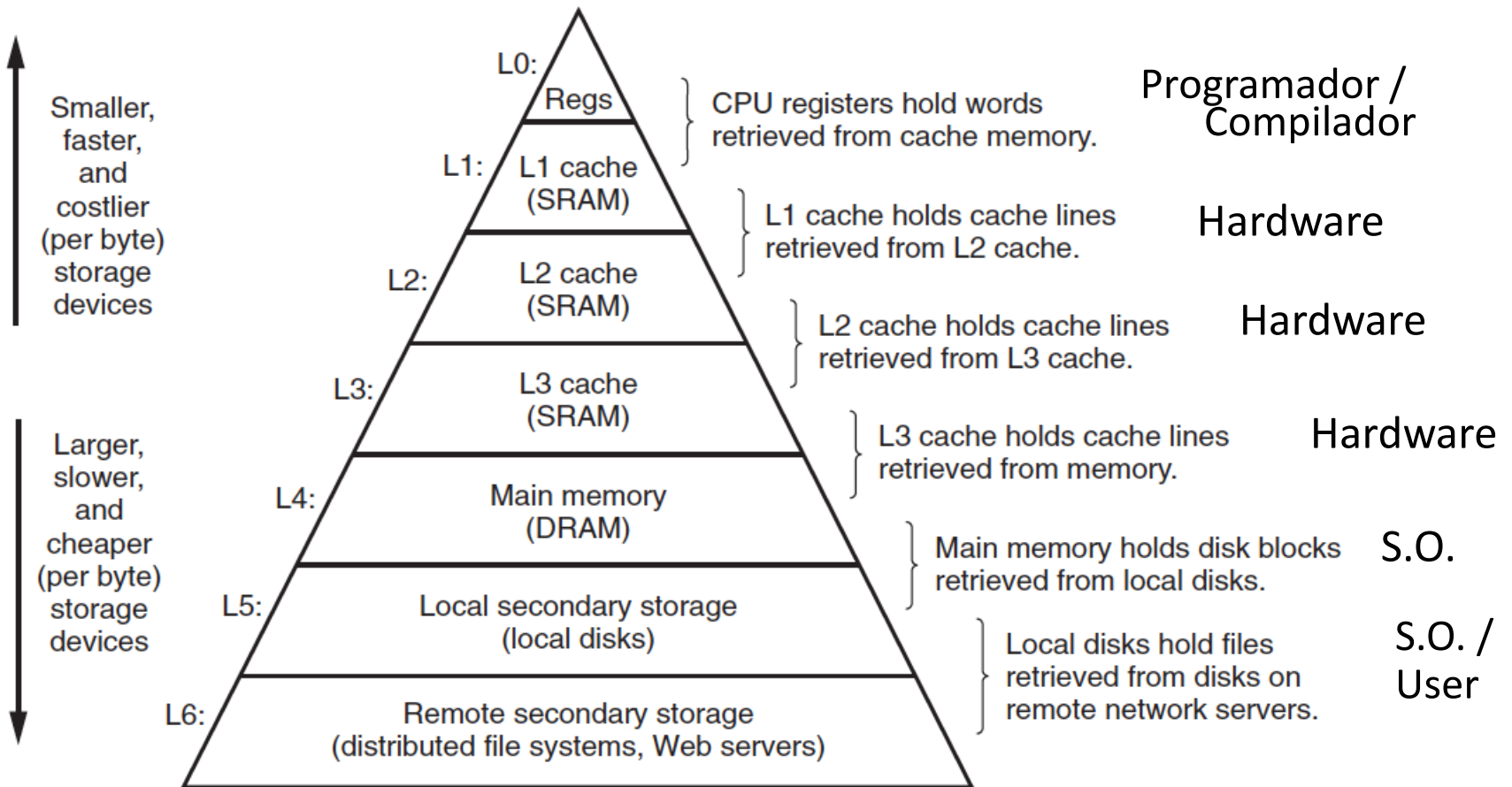
Dotar a máquina de vários níveis de memória, tão mais rápidos (mais caros e menor capacidade) quanto mais perto se encontram do processador.

Cada nível contém uma cópia do código e dados mais usados em cada instante, explorando a localidade.

Hierarquia de Memória

- Abandonamos o modelo de memória linear:
“a memória é um vector (linear) com um tempo de acesso constante para cada *byte*”
- modelo de memória hierárquico:
“a memória é uma estrutura hierárquica com um tempo de acesso a cada *byte* variável e dependente da distância a que se encontra do CPU”

Hierarquia de Memória

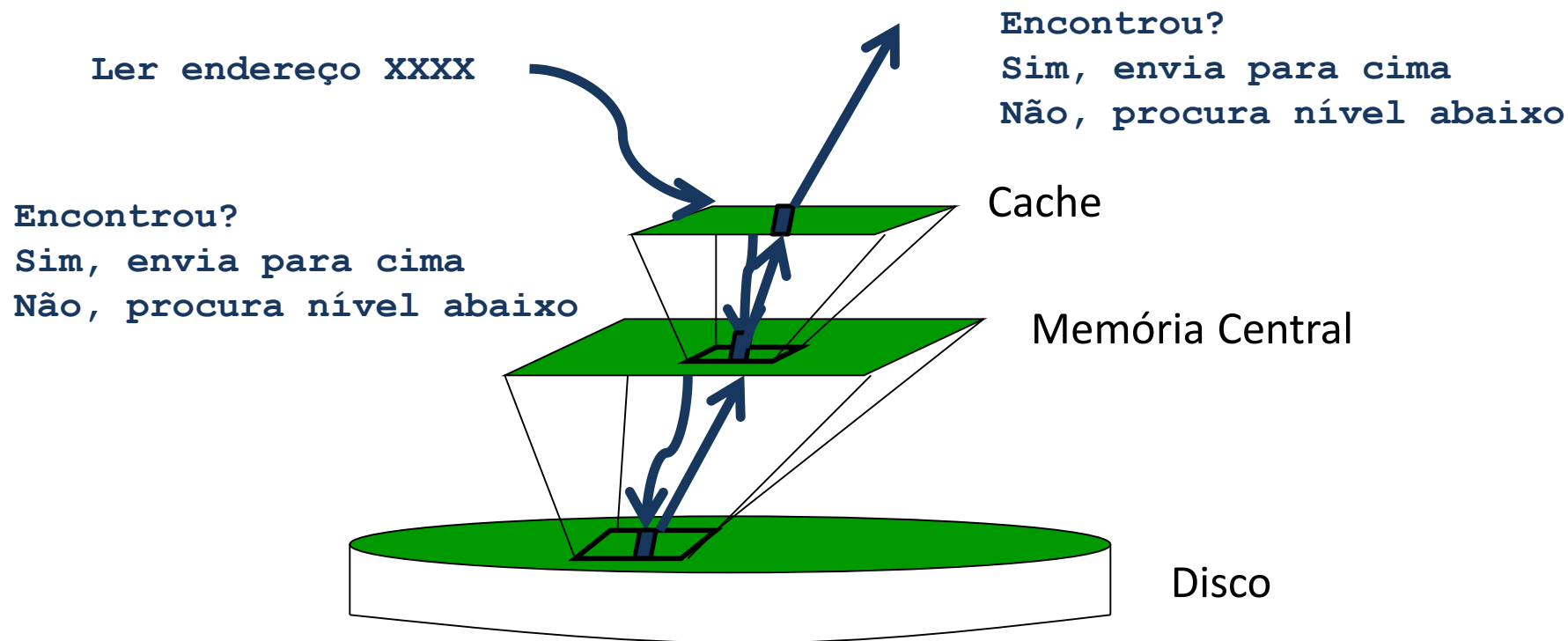


[Computers Systems: A Programmers' Perspective; Bryant & Hallaron; Pearson, 2nd ed.; 2011]

Hierarquia de Memória: Inclusão

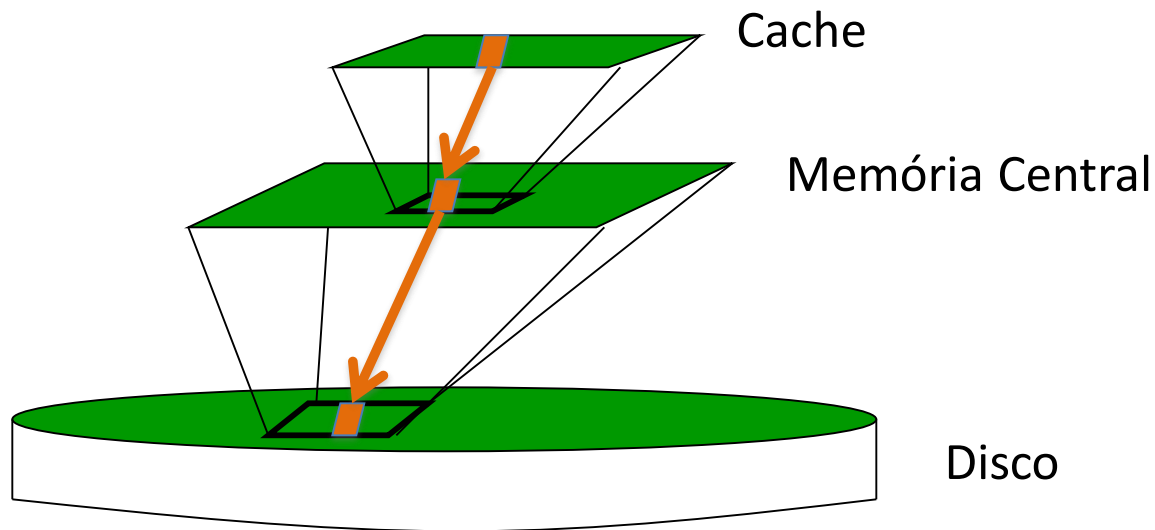
Os dados contidos num nível mais próximo do processador são um sub-conjunto dos dados contidos no nível anterior.

O nível mais baixo contem a totalidade dos dados.



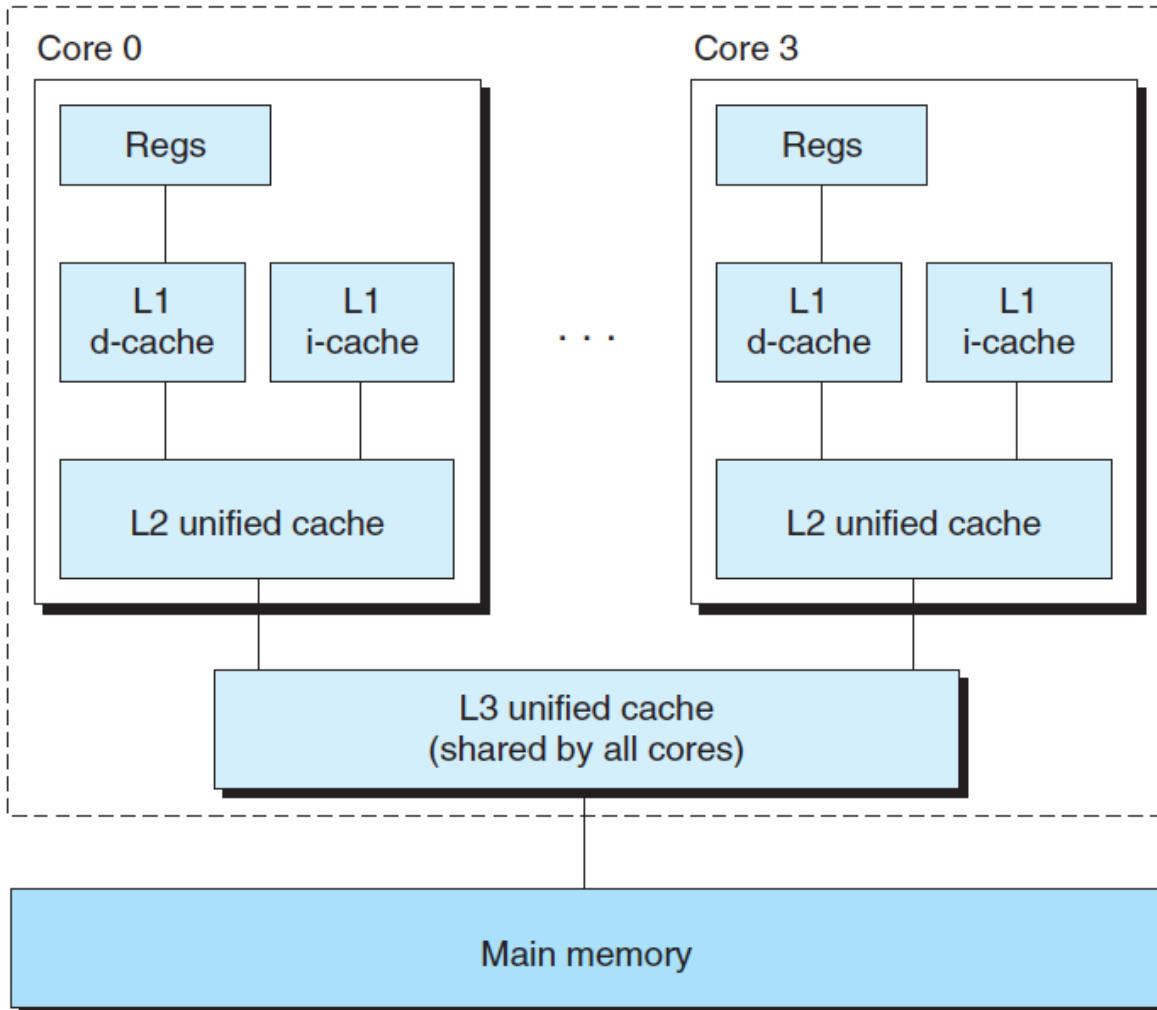
Hierarquia de Memória: Escrita

Uma escrita num nível superior deve (eventualmente) ser propagada para os níveis inferiores.



Intel Core i7 : Hierarquia da memória

Processor package



cache	access (cc)	size
L1-d	4	32 KiB
L1-i	4	32 KiB
L2	11	256 KiB
L3	30-40	8 MiB

[Computers Systems: A Programmers' Perspective; Bryant & Hallaron; Pearson, 2nd ed.; 2011]

Hierarquia de Memória: Terminologia

Bloco – Quantidade de informação que é transferida de cada vez do nível imediatamente acima da hierarquia para o nível actual.

Linha – a cache está dividida em linhas. Cada linha tem o seu endereço (índice) e tem a capacidade de um bloco

Hit – Diz-se que ocorreu um *hit* quando o elemento de memória acedido pelo CPU se encontra na cache.

Miss – Diz-se que ocorreu um *miss* quando o elemento de memória acedido pelo CPU não se encontra na cache, sendo necessário lê-lo do nível inferior da hierarquia.

Cache	
	000
	001
	010
	011
	100
	101
	110
	111

Hierarquia de Memória: Terminologia

Hit rate – Percentagem de *hits* ocorridos relativamente ao total de acessos à memória. $Hit\ rate = \#hits / \#acessos$

Miss rate – Percentagem de *misses* ocorridos relativamente ao total de acessos à memória. $Miss\ rate = (1 - hit\ rate)$

Hit time – Tempo necessário para aceder à cache, incluindo o tempo necessário para determinar se o elemento a que o CPU está a aceder se encontra ou não na cache.

Miss penalty – Penalização incorrida para aceder a um bloco dos níveis superiores da hierarquia, ocorre um *miss*.

Hierarquia de Memória e Localidade

- Localidade Temporal

A primeira vez que um endereço de memória é acedido, é carregado do nível de memória inferior para a *cache* – **cold miss**

O próximo acesso a esse endereço encontra os dados na *cache* – **hit**

(excepto se entretanto foram removidos devido a uma **colisão**, resultando nesse caso numa **miss**)

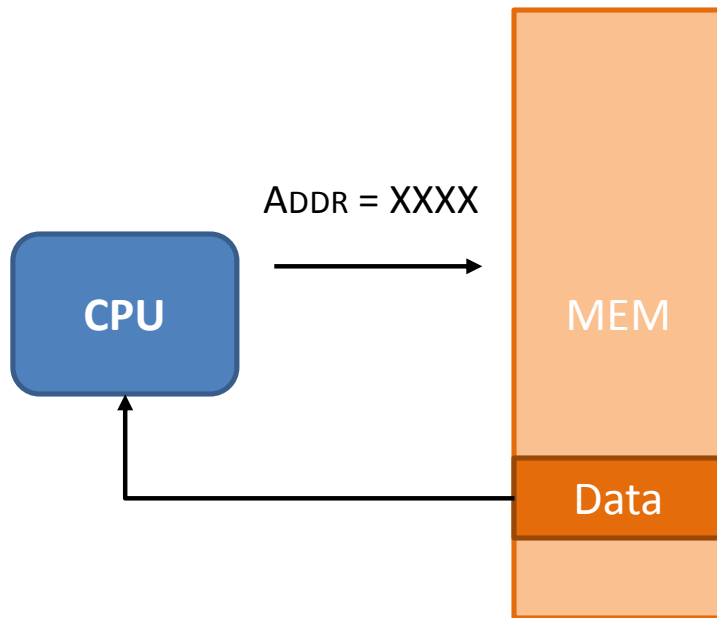
- Localidade Espacial

Quando um endereço é carregado para a *cache*, é carregado um bloco de endereços consecutivos

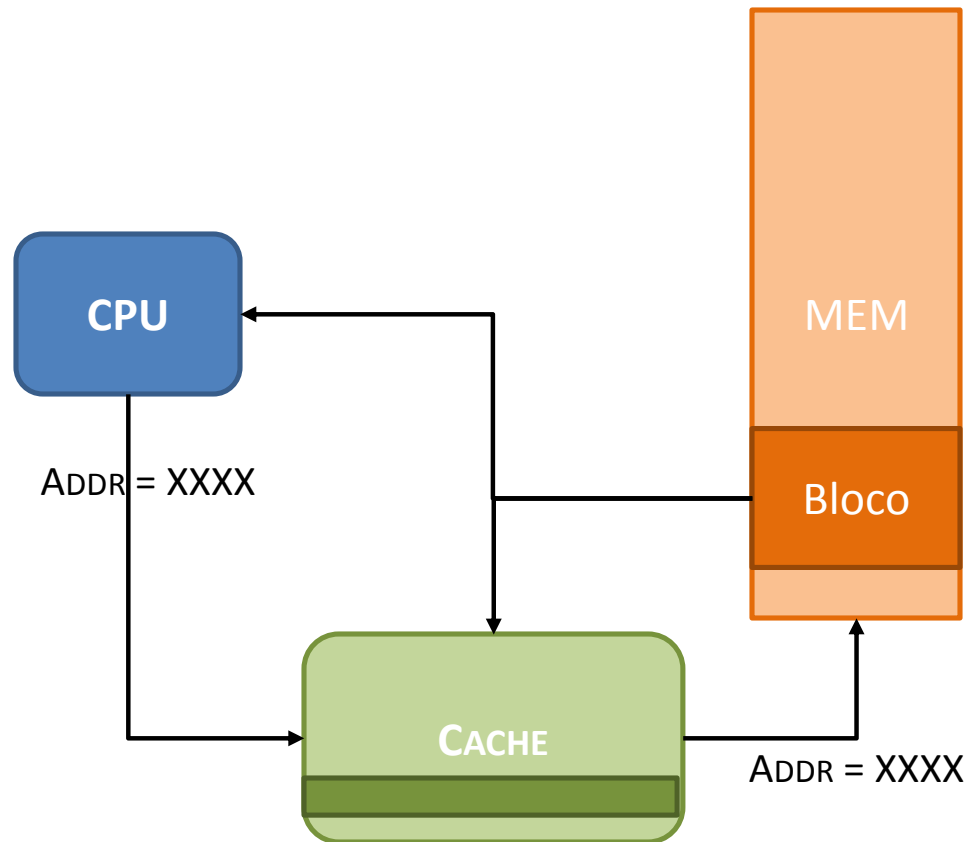
O acesso seguinte a um endereço na vizinhança resulta num **hit**

Hierarquia de Memória – 1º acesso

$$\text{Penalização} = T_{\text{MEM_ACCESS}}$$

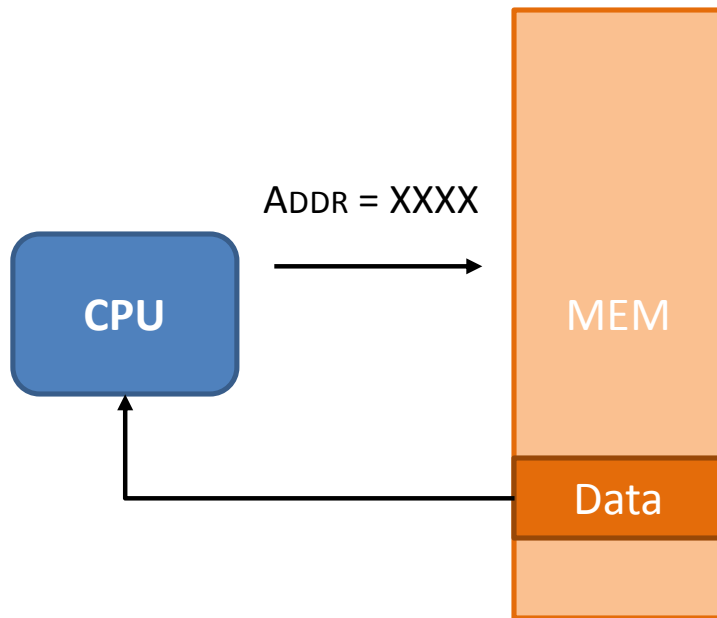


$$\begin{aligned}\text{Penalização} &= \text{HIT_TIME} + T_{\text{MEM_ACCESS}} \\ &= \text{HIT_TIME} + \text{MISS_PENALTY}\end{aligned}$$

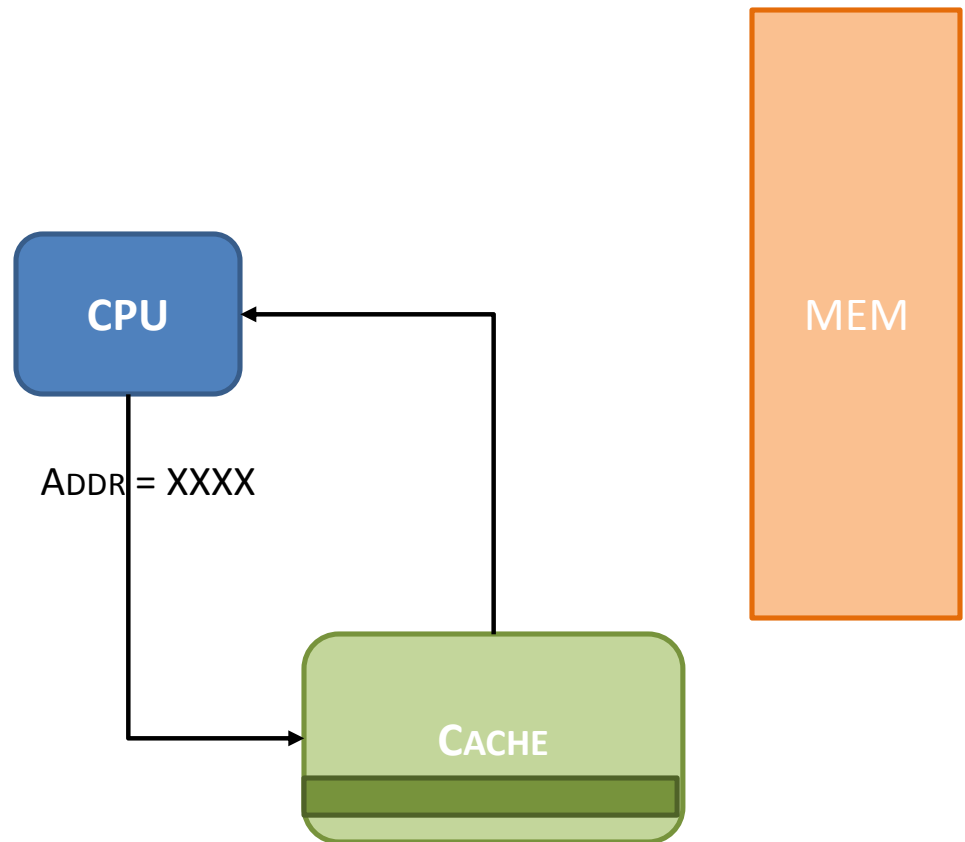


Hierarquia de Memória – localidade temporal

Penalização = $T_{\text{MEM_ACCESS}}$

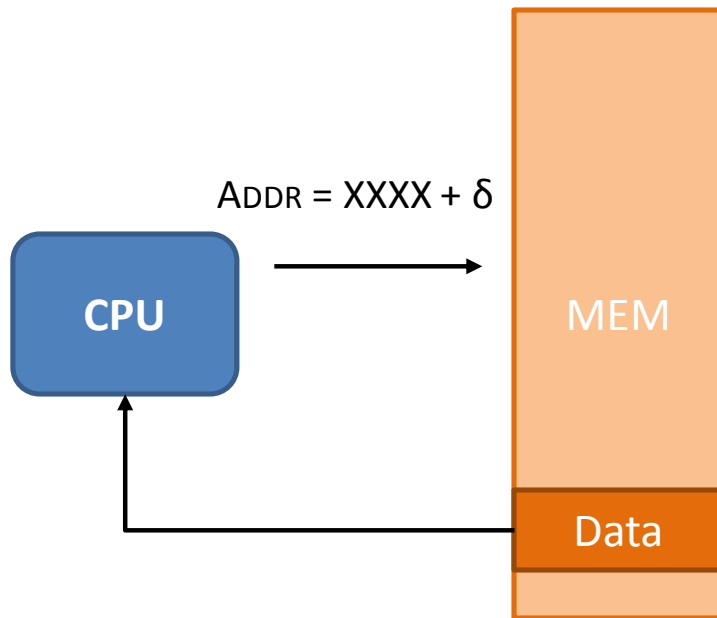


Penalização = HIT_TIME

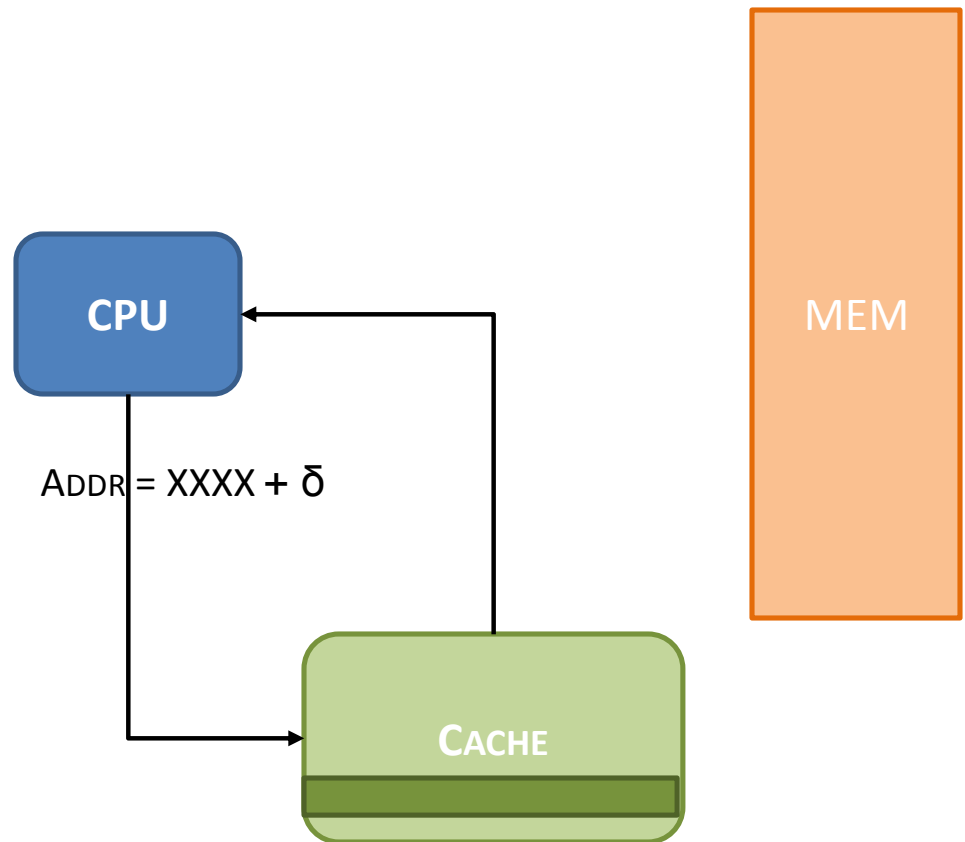


Hierarquia de Memória – localidade espacial

Penalização = $T_{\text{MEM_ACCESS}}$



Penalização = HIT_TIME



Hierarquia da memória - Desempenho

$$T_{exec} = \#I * CPI * T_{cc}$$

Como é que a hierarquia de memória influencia T_{exec} ?

#I – O número de instruções a executar depende do algoritmo, do conjunto de instruções e do compilador.

T_{cc} – é fixo para cada máquina. Não é alterado modificando a organização da memória.

Hierarquia da memória - Desempenho

$$T_{exec} = \#I * CPI * T_{cc}$$

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM}$$

CPI_{CPU} – nº de ciclos que o processador necessita, em média, para executar cada instrução;

O *hit time* considera-se incluído no CPI_{CPU}

CPI_{MEM} – nº de ciclos que o processador espera, em média, por dados da memória central, por que não encontrou estes dados na cache. Estes são vulgarmente designados por ***memory stall cycles*** ou ***wait states***.

$$T_{exec} = \#I * (CPI_{CPU} + CPI_{MEM}) * T_{cc}$$

Hierarquia da memória - Desempenho

$$CPI_{MEM} = CPI_{MEM_I} + CPI_{MEM_D}$$

$$CPI_{MEM_XX} = \%Mem_{XX} * mr_{XX} * mp, XX \in \{I, D\}$$

$$CPI_{MEM} = (\%Mem_I * mr_I + \%Mem_D * mr_D) * mp$$

$\%Mem$: % acesso à memória

mr : miss rate

mp : miss penalty

Instruções – Todas as instruções são lidas da memória, logo a $\%Mem_I = 100\%$.

mr_I refere-se ao acesso às instruções. $< mr_D$ devido à localidade espacial.

Dados – Apenas uma determinada percentagem de instruções acede à memória ($\%Mem_D$). mr_D refere-se ao acesso a dados.

$$CPI_{MEM} = (mr_I + \%Mem_D * mr_D) * mp$$

Hierarquia da memória - Desempenho

$$T_{exec} = \#I * (CPI_{CPU} + CPI_{MEM}) * T_{cc}$$

$$CPI_{MEM} = (mr_I + \%Mem * mr_D) * mp$$

substituindo

$$T_{exec} = \#I * [CPI_{CPU} + (mr_I + \%Mem * mr_D) * mp] * T_{cc}$$

NOTA: A *miss penalty* (*mp*) tem que ser expressa em ciclos do *clock*.

Hierarquia da memória - Desempenho

Considere uma máquina com uma frequência do relógio de 2 GHz, *miss rate* de 4% para instruções, 5% para dados e uma *miss penalty* de 25 ns. Assuma ainda que 40% das instruções são *loads* ou *stores*, e que o CPI_{CPU} é 1. Qual o CPI?

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM} = CPI_{CPU} + (mr_I + \%Mem * mr_D) * mp$$

$$mp_{ciclos} = mp_{tempo} * f = 25 * 10^{-9} * 2 * 10^9 = 50 \text{ ciclos}$$

$$CPI = 1 + (0.04 + 0.4 * 0.05) * 50 = 1 + 3 = 4$$

Se o programa executar 10^9 instruções qual o tempo de execução?

$$T_{exec} = \#I * CPI * T_{cc} = 10^9 * 4 * \frac{1}{2 * 10^9} = 2s$$

Hierarquia da memória - Desempenho

Considere um programa com as características apresentadas na tabela, a executar numa máquina **ideal** com memória de tempo de acesso 0. Se a frequência do processador for 2 GHz, qual o CPI médio e o tempo de execução?

Instrução	Nº Instruções	CPI _{CPU}
Cálculo	$3 \cdot 10^8$	1,1
Acesso à Mem.	$6 \cdot 10^8$	2,5
Salto	$1 \cdot 10^8$	1,7
TOTAL:	10^9	

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM} = (3 \cdot 1.1 + 6 \cdot 2.5 + 1 \cdot 1.7) / 10 + 0 = 2$$

$$T_{exec} = \#I * CPI * T_{cc} = 10^9 * 2 * \frac{1}{2 \cdot 10^9} = 1s$$

Hierarquia da memória - Desempenho

Considere o mesmo programa e máquina do acetato anterior, mas agora com um tempo de acesso à memória de 10 ns (por palavra ou instrução). Suponha ainda que esta máquina não tem cache. Qual o CPI efectivo e T_{exec} ?

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM} = CPI_{CPU} + (mr_I + \%Mem * mr_D) * mp$$

Se a máquina não tem cache, então $mr_I = mr_D = 100\%$.

Da tabela tiramos que $\%Mem = 60\%$.

mp expresso em ciclos do relógio é $10 * 2 = 20$ ciclos ($f=2$ GHz)

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM} = 2 + (1 + 0.6 * 1) * 20 = 2 + 32 = 34$$

$$T_{exec} = \#I * CPI * T_{cc} = 10^9 * 34 * \frac{1}{2 * 10^9} = 17s$$

Hierarquia da memória - Desempenho

Considere agora que existe uma *cache* com linhas de 4 palavras; a *miss rate* de acesso às instruções é de 6% e de acesso aos dados é de 10%; o tempo de acesso à memória central é constituído por uma latência de 40 ns mais 10 ns por palavra. Qual o CPI médio e o tempo de execução?

$$mp = 40 + 10 * 4 = 80 \text{ ns} ; \text{ em ciclos } mp = 80 * 2 = 160 \text{ ciclos}$$

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM} = 2 + (0.06 + 0.6 * 0.1) * 160 = 2 + 19.2 = 21.2$$

$$T_{exec} = \#I * CPI * T_{cc} = 10^9 * 21.2 * \frac{1}{2 * 10^9} = 10.6s$$

Hierarquia da memória - Desempenho

Suponha que a capacidade da *cache* é aumentada para o dobro, ficando a *cache* com o dobro das linhas e resultando numa *miss rate* de acesso às instruções de 3.2% e acesso aos dados de 8%. No entanto, o tempo de acesso à cache (*hit time*) também aumenta, resultando num CPI_{CPU} de 2.5 . Qual o CPI médio e o tempo de execução?

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM} = 2.5 + (0.032 + 0.6 * 0.08) * 160 = 2.5 + 12.8 = 15.3$$

$$T_{exec} = \#I * CPI * T_{cc} = 10^9 * 15.3 * \frac{1}{2 * 10^9} = 7.65s$$

Hierarquia da memória - Desempenho

Para tirar maior partido da localidade espacial aumentou-se o número de palavras por linha de 4 para 8, reduzindo a *miss rate* de instruções para 1% e de dados para 6%. O tempo de acesso à memória central é composto por uma latência de 40 ns mais 10 ns por palavra. Qual o CPI médio e o tempo de execução?

$$mp = 40 + 10 * 8 = 120 \text{ ns} ; \text{ em ciclos } mp = 120 * 2 = 240 \text{ ciclos}$$

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM} = 2.5 + (0.01 + 0.6 * 0.06) * 240 = 2.5 + 11.04 = 13.52$$

$$T_{exec} = \# I * CPI * T_{cc} = 10^9 * 13.52 * \frac{1}{2 * 10^9} = 6.76s$$

Hierarquia da memória - Desempenho

Para reduzir a *miss penalty* a memória central foi substituída por outra com uma latência de 40 ns e 5 ns por palavra. Qual o CPI médio e o tempo de execução?

$$mp = 40 + 5 * 8 = 80 \text{ ns} ; \text{ em ciclos } mp = 80 * 2 = 160 \text{ ciclos}$$

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM} = 2.5 + (0.01 + 0.6 * 0.06) * 160 = 2.5 + 7.36 = 9.86$$

$$T_{exec} = \#I * CPI * T_{cc} = 10^9 * 9.86 * \frac{1}{2 * 10^9} = 4.93s$$

Hierarquia da memória - Desempenho

O processador foi substituído por outro com uma frequência de 3 GHz, sem que a memória tenha sofrido qualquer alteração. Qual o CPI médio e o tempo de execução?

O ciclo do relógio é agora de 0.33 ns, logo $mp = 80 \cdot 3 = 240$ ciclos

$$CPI = CPI_{CPU} + CPI_{MEM} = 2.5 + (0.01 + 0.6 \cdot 0.06) \cdot 240 = 2.5 + 11.04 = 13.54$$

$$T_{exec} = \#I \cdot CPI \cdot T_{cc} = 10^9 \cdot 13.54 \cdot \frac{1}{3 \cdot 10^9} = 4.513s$$