

Instruction Level Parallelism
Super Escalaridade

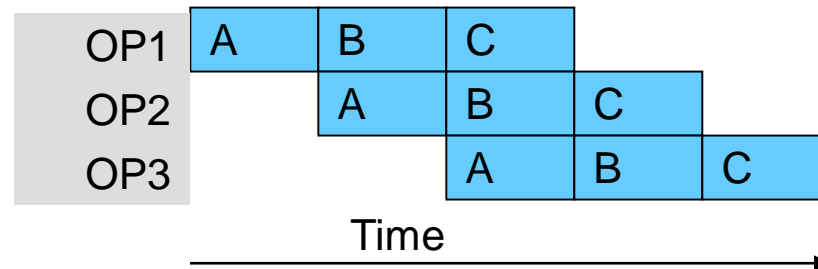
Arquitetura de Computadores
Mestrado Integrado em
Engenharia Informática

Material de Apoio

- *“Computer Organization and Design: The Hardware / Software Interface”*
David A. Patterson, John L. Hennessy; 5th Edition, 2013
 - Secção 4.10 (pags. 332 .. 344) – Parallelism via instructions
 - Secção 4.11 (pags. 344 .. 351) – Real Stuff
- *“Computer Systems: a Programmer's Perspective”*; Randal E. Bryant, David R. O'Hallaron--Pearson (2nd ed., 2011)
 - Secção 5.7 (pags. 496 .. 500) – Understanding modern processors
 - ADVANCED MATERIAL:
Secção 5.7.2 .. 5.9 (pags. 523 .. 446) – Understanding modern processors

Pipelining

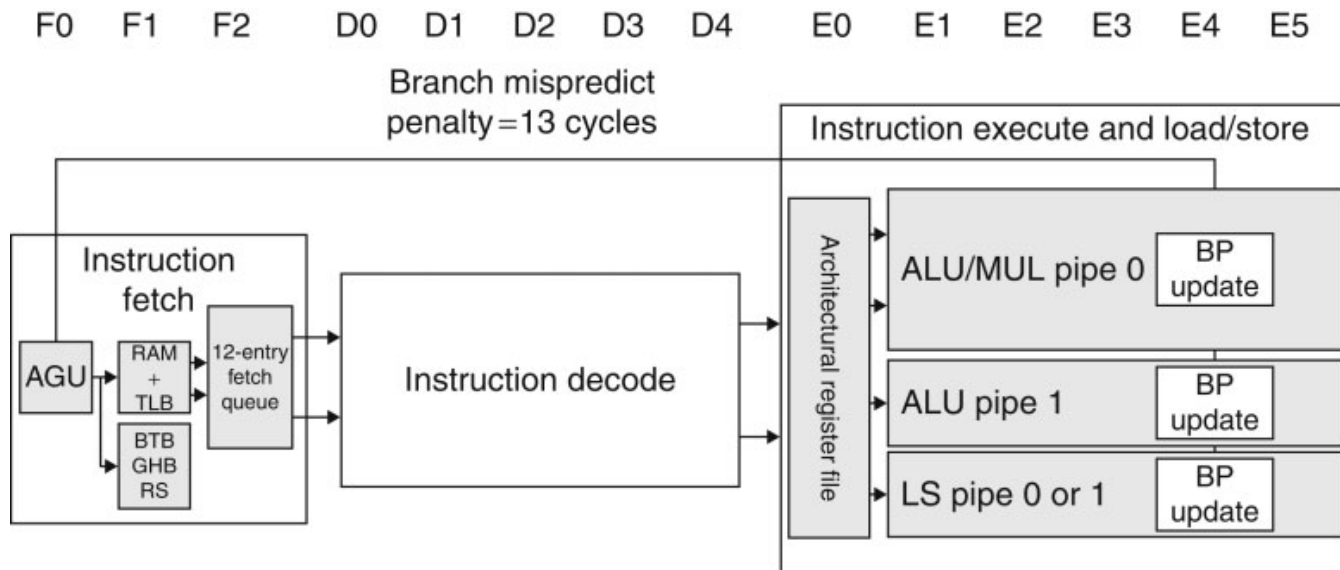
- Explora ILP (*Instruction Level Parallelism*) por permitir a execução simultânea de múltiplas instruções em diferentes estágios



- Permite aumentar a frequência, relativamente a organizações de ciclo único
- O CPI ideal é 1, mas difícil de manter devido a
 - dependências de dados;
 - dependências de controlo;
 - atrasos nos acessos à memória

Multiple Issue

- Uma abordagem complementar consiste em ter múltiplos *pipelines* (múltiplas unidades funcionais), permitindo a execução simultânea de múltiplas instruções -> *multiple issue*



[FIGURE 4.75 – Patterson & Hennessy; Computer Organization & Design – 5th Edition, Elsevier, 2013
--- The A8 pipeline]

Multiple Issue

- As múltiplas unidades funcionais permitem o lançamento (*issue*) de mais do que uma instrução por ciclo, logo, potencialmente podemos ter $CPI < 1$
- Um processador com 4 unidades funcionais, cada organizada como um *pipeline* de 5 estágios, pode ter 20 instruções a ser executadas simultaneamente em cada ciclo
- Os processadores actuais mais avançados tentam lançar (*issue*) 3 a 6 instruções por ciclo

Multiple Issue: Limitações

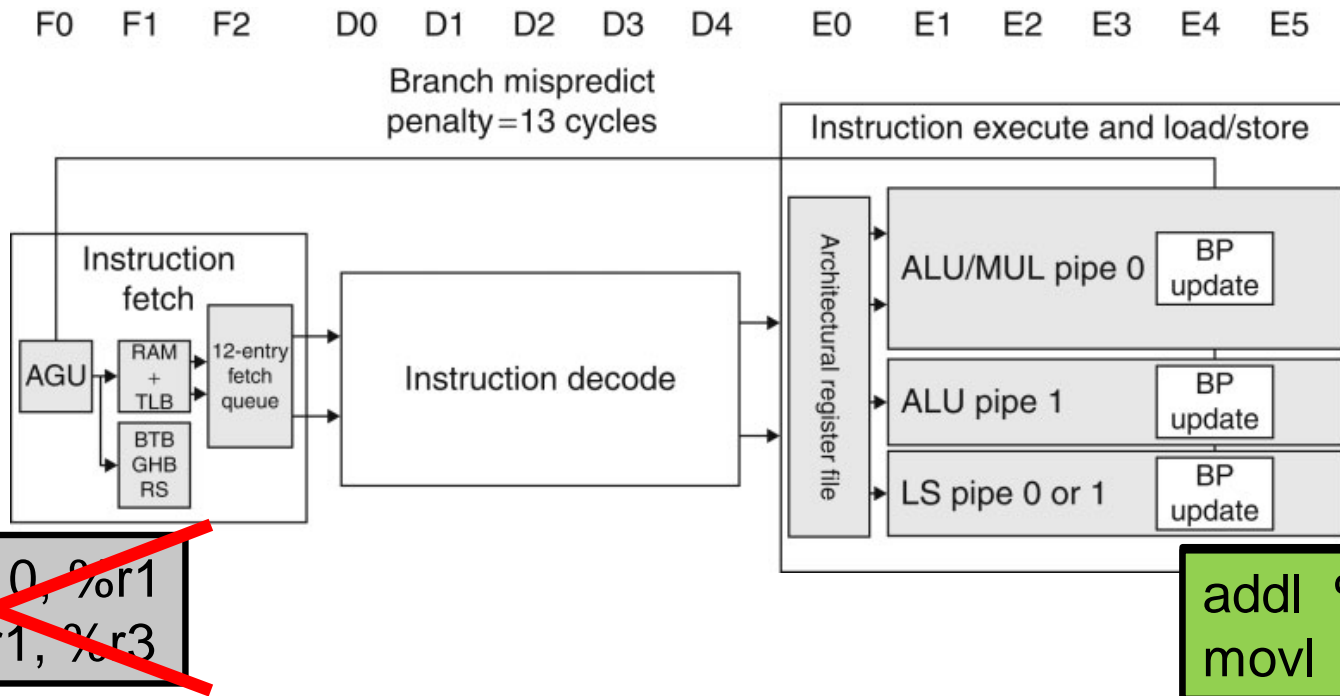
- Existem no entanto limitações ao número de instruções que podem executar em simultâneo:
 - dependências de dados e/ou controlo
 - disponibilidade de recursos: número e tipo de unidades funcionais, latência de diferentes instruções, atrasos no acesso à memória
- Quem determina quais as instruções que podem ser lançadas simultaneamente?

<i>static issue</i>	<i>dynamic issue</i>
compilador	processador
	Embora o compilador possa ordenar as instruções por forma a facilitar o <i>multiple issue</i>

Static Multiple Issue

- O compilador agrupa em pacotes as instruções que serão lançadas (*issued*) em cada ciclo do relógio
- Estes pacotes de instruções concatenadas podem ser vistos como uma única instrução com múltiplas operações:
VLIW – Very Long Instruction Word
- Uma VLIW comporta tantas instruções quantos os *pipelines* (unidades funcionais) disponíveis
- O compilador é responsável por:
 - garantir que não há dependências dentro de uma VLIW
 - que as instruções integradas numa VLIW podem ser executadas pelas unidades funcionais
 - resolver dependências de controlo ou dependências de dados entre diferentes VLIW

Static Multiple Issue – Exemplo: ARM Cortex A8



Pipe 0	Pipe 1	Válido ?
movl \$10, %r1	movl (%r2), %r3	
movl \$10, %r1	addl %r1, %r3	
movl (%r2), %r3	movl (%r4), %r5	

Static Multiple Issue – Exemplo: MIPS

- Considere uma versão com *static multiple issue* do MIPS, com 2 *pipelines*:
 - Pipe 0 : ALU ou *branch*
 - Pipe 1 : *load / store*

Loop:

```
lw $t0, 0($s1)
addu $t0, $t0, $s2
sw $t0, 0($s1)
addi $s1, $s1, -4
bne $s1, $zero, Loop
```

CC	Pipe 0 (ALU/Branch)	Pipe 1 (LS)
1	nop	lw \$t0, 0(\$s1)
2	addu \$t0, \$t0, \$s2	nop
3	addi \$s1, \$s1, -4	sw \$t0, 4(\$s1)
4	bne \$s1, \$zero, Loop	
CPI	4 / 5 = 0.8	

Loop Unrolling– Exemplo: MIPS

Loop:

```
lw $t0, 0($s1)
addu $t0,$t0,$s2
sw $t0, 0($s1)
addi $s1,$s1,-4
bne $s1,$zero,Loop
```

Loop:

```
lw $t0, 0($s1)
addu $t0,$t0,$s2
sw $t0, 0($s1)
lw $t1, -4($s1)
addu $t1,$t1,$s2
sw $t1, -4($s1)
addi $s1,$s1,-8
bne $s1,$zero,Loop
```

anti-dependência -> *register renaming*

CC	Pipe 0 (ALU/Branch)	Pipe 1 (LS)
1	nop	lw \$t0, 0(\$s1)
2	addu \$t0,\$t0,\$s2	lw \$t1, -4(\$s1)
3	addu \$t1,\$t1,\$s2	sw \$t0, 0(\$s1)
4	addi \$s1,\$s1,-8	sw \$t1, -4(\$s1)
5	bne \$s1,\$zero,Loop	nop
CPI	5 / 8 = 0.625	

Loop Unrolling

- Consiste em fazer múltiplas cópias do corpo de um ciclo (normalmente feito pelo compilador)

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

```
for (i=0 ; i<N ; i+=3) {  
    a[i] = a[i] + var;  
    a[i+1] = a[i+1] + var;  
    a[i+2] = a[i+2] + var;  
}
```

- O seu efeito no desempenho nem sempre é positivo
- Contribui para:
 - disponibilizar mais instruções independentes para aumentar o ILP, e consequentemente reduzir o CPI
 - reduzir o número de instruções executadas

Static Multiple Issue: Limitação

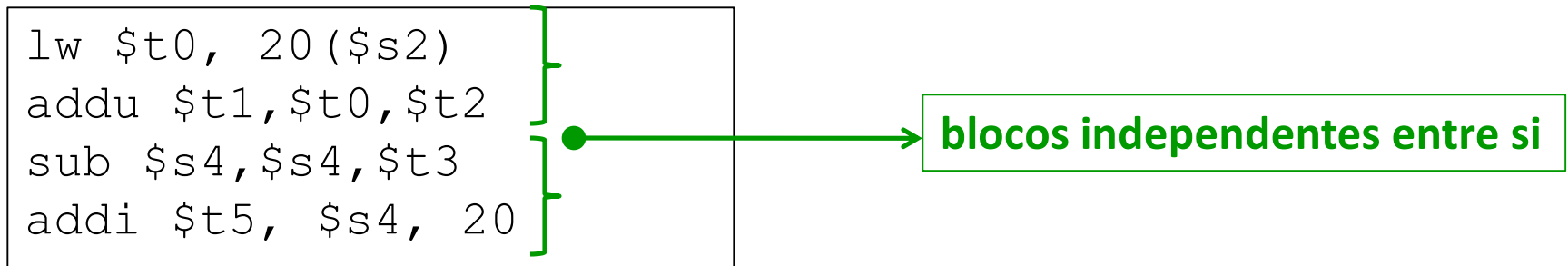
- O código gerado depende da organização do processador (número, tipo e desempenho das unidades funcionais)
- A mudança para diferentes implementações da mesma arquitectura:
 - frequentemente exige recompilação para que o código execute;
 - noutros casos, exige recompilação para manter um desempenho aceitável

Dynamic Multiple Issue

- O **processador** selecciona dinamicamente, **em tempo de execução**, quais as instruções a executar em cada *pipeline* (unidade funcional)
- Diminui a dependência da compilação, relativamente à abordagem estática, pois é o *hardware* que selecciona as instruções de acordo com a sua própria organização

SuperEscalaridade: *in-order scheduling*

- ***in-order scheduling***: instruções seleccionadas na ordem com que aparecem no programa, baseado na disponibilidade dos operandos e de unidades funcionais apropriadas



CC	Pipe 0 (ALU/Branch)	Pipe 1 (LS)
1	nop	lw \$t0, 20(\$s2)
2	addu \$t1, \$t0, \$s2	nop
3	sub \$s4, \$s4, \$t3	nop
4	addi \$t5, \$s4, 20	nop
CPI	4 / 4 = 1	

SuperEscalaridade: *out-of-order scheduling*

- ***out-of-order scheduling***: as instruções são reordenadas pelo processador para minimizar o CPI, garantindo a correcta execução do programa

```
lw $t0, 20($s2)
addu $t1,$t0,$t2
sub $s4,$s4,$t3
addi $t5, $s4, 20
```

CC	Pipe 0 (ALU/Branch)	Pipe 1 (LS)
1	sub \$s4,\$s4,\$t3	lw \$t0, 20(\$s2)
2	addu \$t1,\$t0,\$s2	nop
3	addi \$t5, \$s4, 20	nop
CPI	3 / 4 = 0.75	

Scheduling - Exercícios

- Implementação do MIPS com 2 unidade funcionais:
 - 0 : operações sobre inteiros e saltos (1 ciclo)
 - 1 : *loads* (2 ciclos) e *stores* (1 ciclo)

Apesar de 1 *load* tomar 2 ciclos, pode-se iniciar uma instrução a cada ciclo (*pipeline* profundidade 2)
- Para o programa abaixo e para 2 iterações, calcule #I, #cc e CPI, para cada política de escalonamento

```
I1:    lw      %t0, 0(%s0)
I2:    addi    %t0, %t0, $20
I3:    sw      %t0, 0(%s0)
I4:    addi    %s0, %s0, -4
I5:    bnz     I1
```


Scheduling: *in-order multiple issue*

```

I1:  lw    %t0, 0(%s0)
I2:  addi  %t0, %t0, $20
I3:  sw    %t0, 0(%s0)
I4:  addi  %s0, %s0, -4
I5:  bnz   I1
    
```

#I = 5 #cc = 5 CPI = 1

cc	0 (int + b)	1 (load / store)
1	nop	lw %t0, 0(%s0)
2	nop	
3	addi %t0,\$t0,20	nop
4	addi %s0,\$s0,-4	sw %t0, 0(%s0)
5	bnz I1	nop
6		
7		
8		
9		
10		

Scheduling: *in-order multiple issue; unroll = 2*

```

I1:  lw      %t0, 0(%s0)
I2:  addi    %t0, %t0, $20
I3:  sw      %t0, 0(%s0)
I4:  addi    %s0, %s0, -4
I5:  addi    %t1, %t1, $20
I6:  sw      %t1, -4(%s0)
I7:  addi    %s0, %s0, -8
I8:  bnz     I1
    
```

#I = 8
#cc = 9
CPI = 1.125

cc	0 (int + b)	1 (load / store)
1	nop	lw %t0, 0(%s0)
2	nop	
3	addi %t0,%t0,20	nop
4	nop	sw %t0, 0(%s0)
5	nop	lw %t1, -4(%s0)
6	nop	
7	addi %t1,%t1,20	nop
8	addi %s0,%s0,-8	sw %t1, -4(%s0)
9	bnz I1	nop
10		

Scheduling: *out of order multiple issue; unroll = 2*

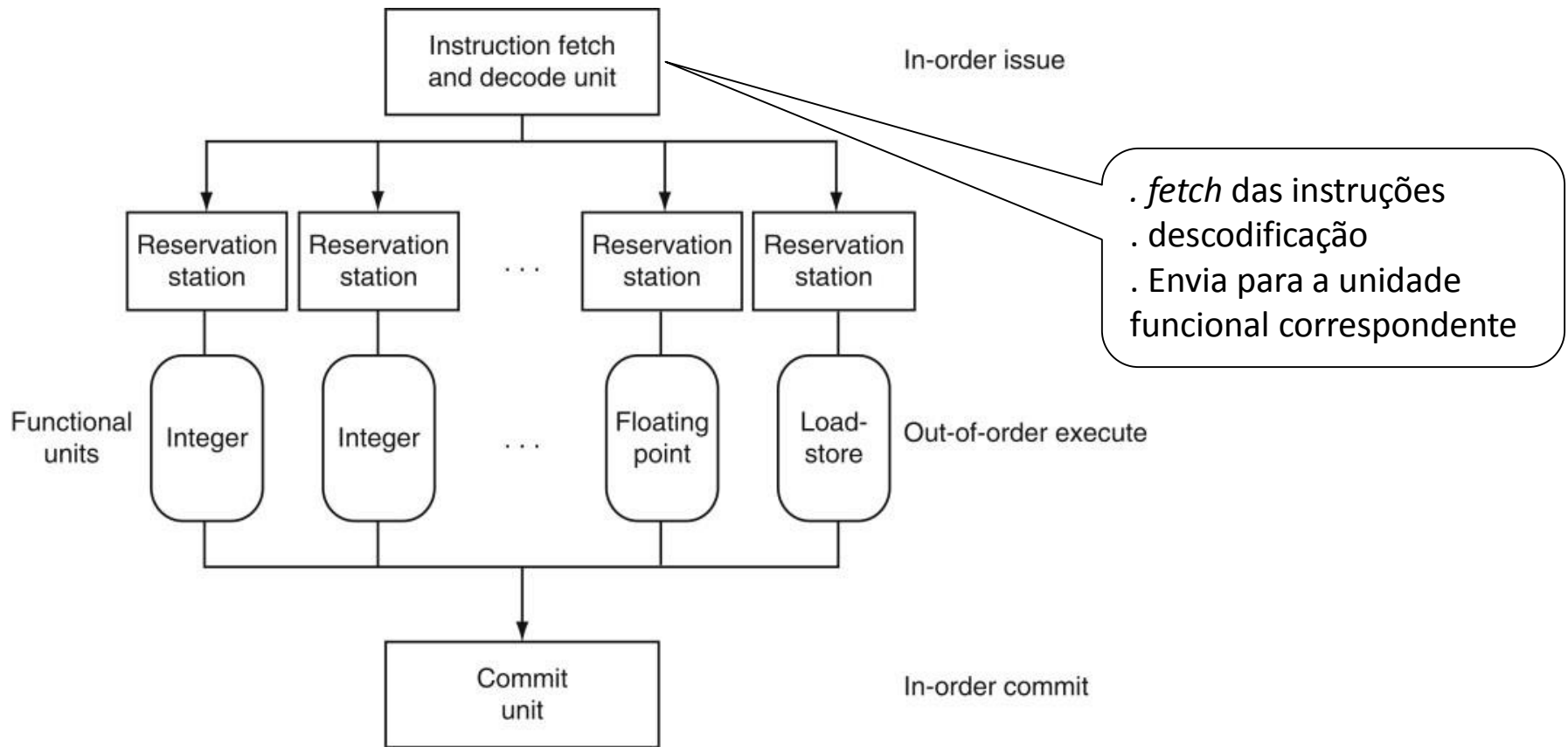
```

I1:    lw      %t0, 0(%s0)
I2:    addi    %t0, %t0, $20
I3:    sw      %t0, 0(%s0)
I4:    lw      %t1, -4(%s0)
I5:    addi    %t1, %t1, $20
I6:    sw      %t1, -4(%s0)
I7:    addi    %s0, %s0, -8
I8:    bnz     I1
    
```

#I = 8
#cc = 6
CPI = 0.75

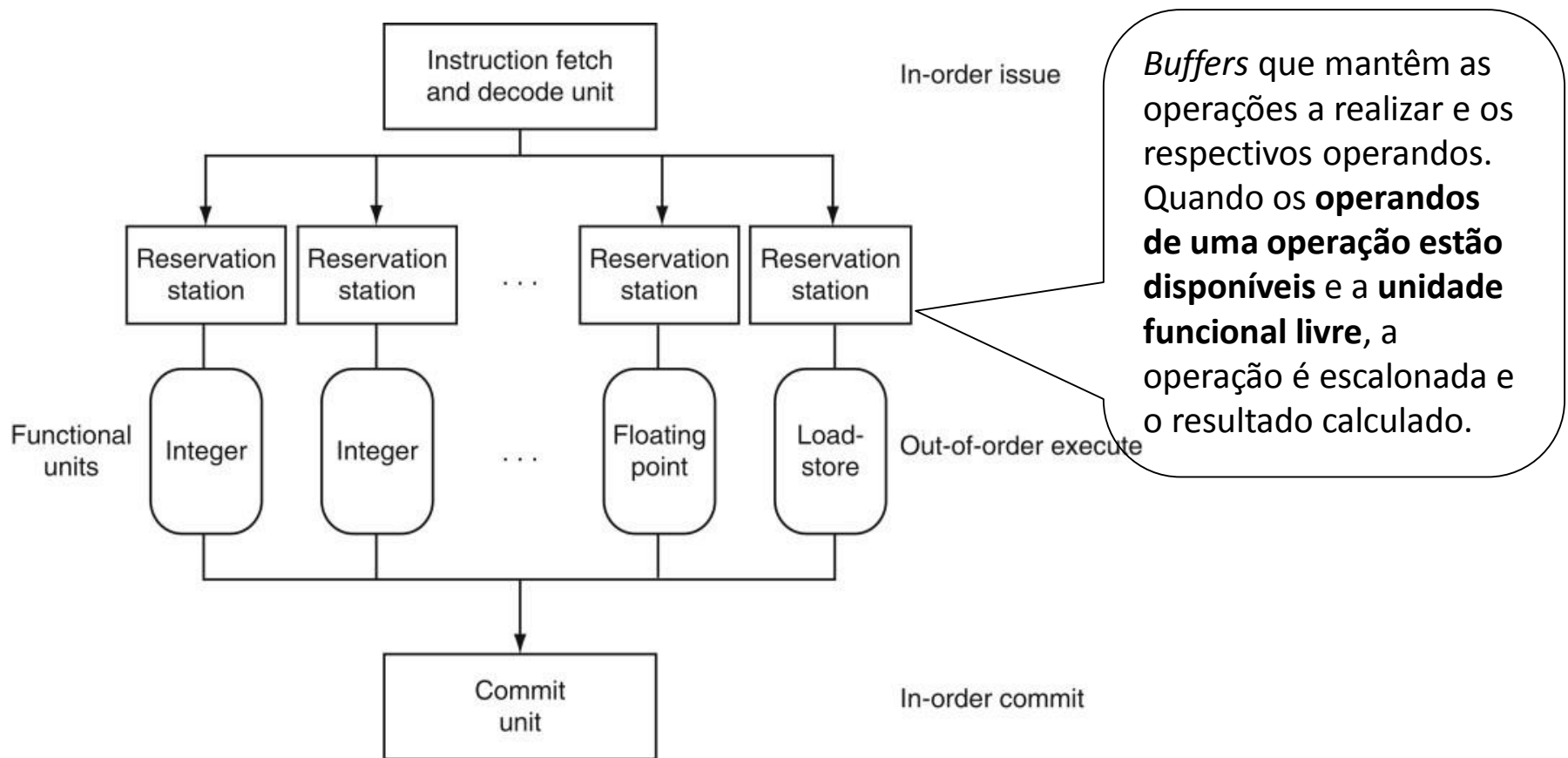
cc	0 (int + b)	1 (load / store)
1	nop	lw %t0, 0(%s0)
2	nop	lw %t1, -4(%s0)
3	addi %t0,%t0,\$20	
4	addi %t1,%t1,\$20	sw %t0, 0(%s0)
5	addi %s0,%s0,-8	sw %t1, -4(%s0)
6	bnz I1	nop
7		
8		
9		
10		

SuperEscalaridade: organização



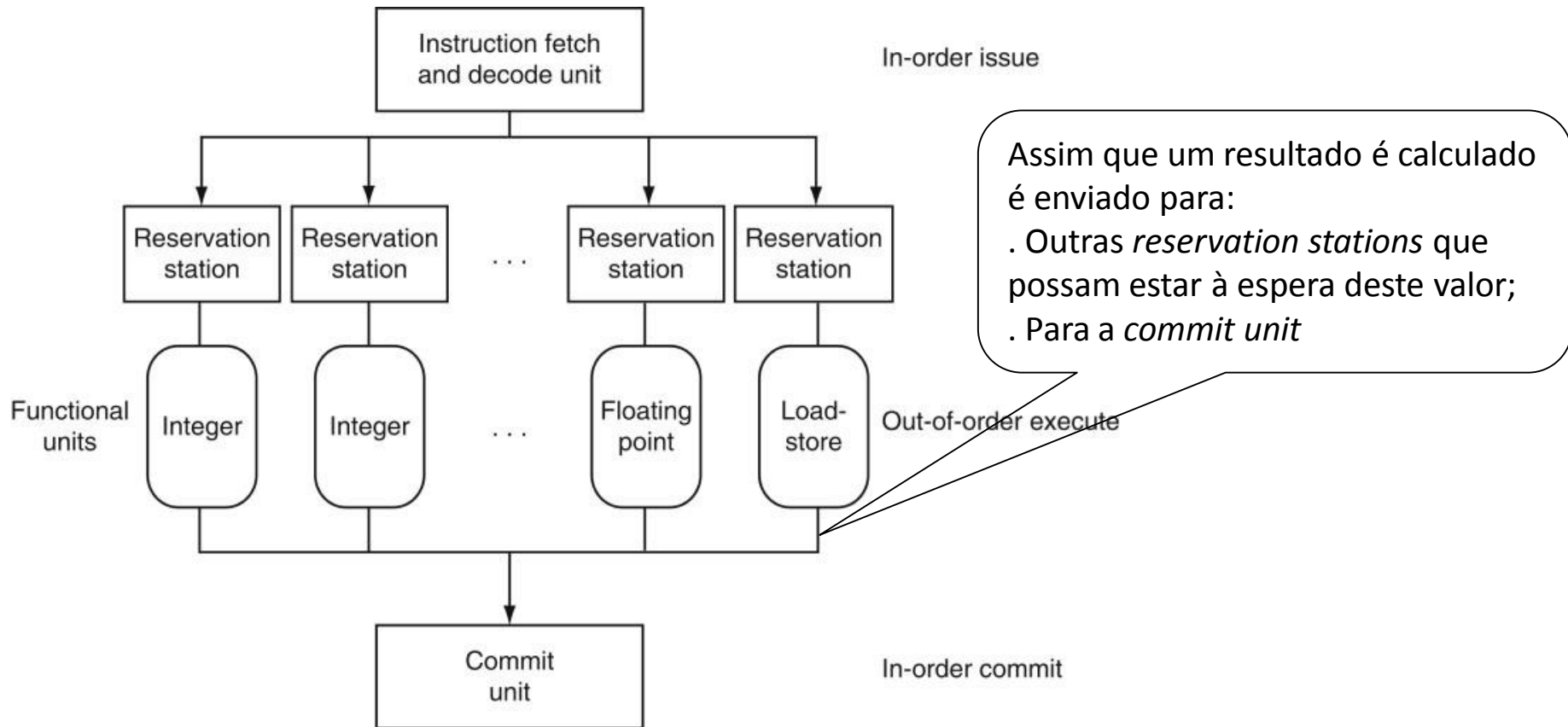
[FIGURE 4.72 – Patterson & Hennessy; Computer Organization & Design – 5th Edition, Elsevier, 2013 --- As 3 unidades primárias para *dynamic pipeline scheduling*]

SuperEscalaridade: organização



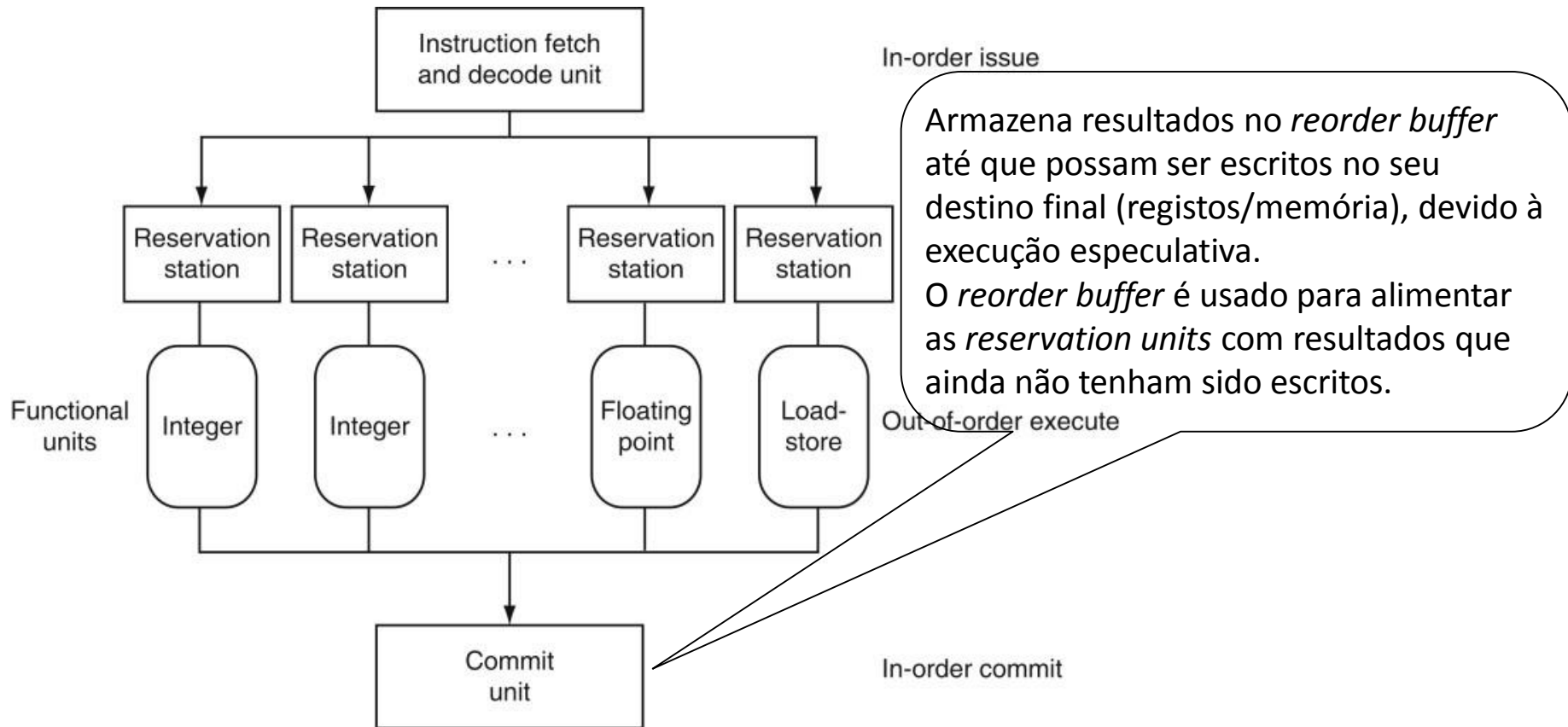
[FIGURE 4.72 – Patterson & Hennessy; Computer Organization & Design – 5th Edition, Elsevier, 2013 --- As 3 unidades primárias para *dynamic pipeline scheduling*]

SuperEscalaridade: organização



[FIGURE 4.72 – Patterson & Hennessy; Computer Organization & Design – 5th Edition, Elsevier, 2013 --- As 3 unidades primárias para *dynamic pipeline scheduling*]

SuperEscalaridade: organização



[FIGURE 4.72 – Patterson & Hennessy; Computer Organization & Design – 5th Edition, Elsevier, 2013 --- As 3 unidades primárias para *dynamic pipeline scheduling*]

ILP: limitações

- *Pipelining* e *multiple issue* são usados para explorar *Instruction Level Parallelism* (ILP)
- No entanto, na maior parte das aplicações é difícil lançar mais do que duas instruções por ciclo:
 1. Existem dependências de controlo e dados no código que limitam o paralelismo disponível;
 2. Penalizações devido ao acesso à memória limitam a capacidade de manter os múltiplos *pipelines* constantemente ocupados.

Eficiência Energética

- O aumento do número de estágios dos *pipelines* juntamente com o controlo associado à execução especulativa resultam numa perda de eficiência energética (performance per joule).
- Processadores mais simples, embora exibam menor desempenho, apresentam melhores *ratios* performance per joule.

Microprocessor	Year	Clock Rate	Pipeline Stages	Issue Width	Out-of-Order/ Speculation	Cores/ Chip	Power	
Intel 486	1989	25 MHz	5	1	No	1	5	W
Intel Pentium	1993	66 MHz	5	2	No	1	10	W
Intel Pentium Pro	1997	200 MHz	10	3	Yes	1	29	W
Intel Pentium 4 Willamette	2001	2000 MHz	22	3	Yes	1	75	W
Intel Pentium 4 Prescott	2004	3600 MHz	31	3	Yes	1	103	W
Intel Core	2006	2930 MHz	14	4	Yes	2	75	W
Intel Core i5 Nehalem	2010	3300 MHz	14	4	Yes	1	87	W
Intel Core i5 Ivy Bridge	2012	3400 MHz	14	4	Yes	8	77	W

[FIGURE 4.73 – P
Pentium 4 pipeli

Intel Core i7 8700K; Q4 2017; 6 cores; 3700 MHz
(Max Turbo: 4700 MHz); 95 W

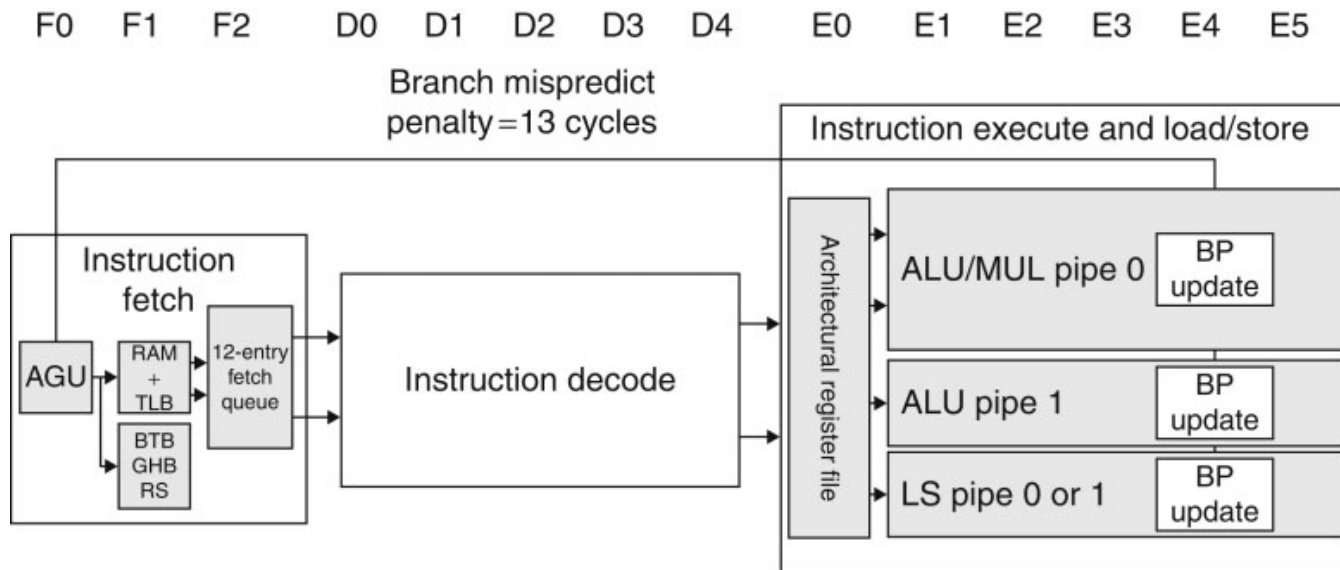
---The
per.]

ARM Cortex-A8 vs Intel Core i7

Processor	ARM A8	Intel Core i7 920
Market	Personal Mobile Device	Server, Cloud
Thermal design power	2 Watts	130 Watts
Clock rate	1 GHz	2.66 GHz
Cores/Chip	1	4
Floating point?	No	Yes
Multiple Issue?	Dynamic	Dynamic
Peak instructions/clock cycle	2	4
Pipeline Stages	14	14
Pipeline schedule	Static In-order	Dynamic Out-of-order with Speculation
Branch prediction	2-level	2-level
1st level caches / core	32 KiB I, 32 KiB D	32 KiB I, 32 KiB D
2nd level cache / core	128–1024 KiB	256 KiB
3rd level cache (shared)	–	2–8 MiB

[FIGURE 4.74 – Patterson & Hennessy; Computer Organization & Design – 5th Edition, Elsevier, 2013]

ARM Cortex A8



[FIGURE 4.75 – Patterson & Hennessy; Computer Organization & Design – 5th Edition, Elsevier, 2013 --- The A8 pipeline]

ARM Cortex A8 - Desempenho

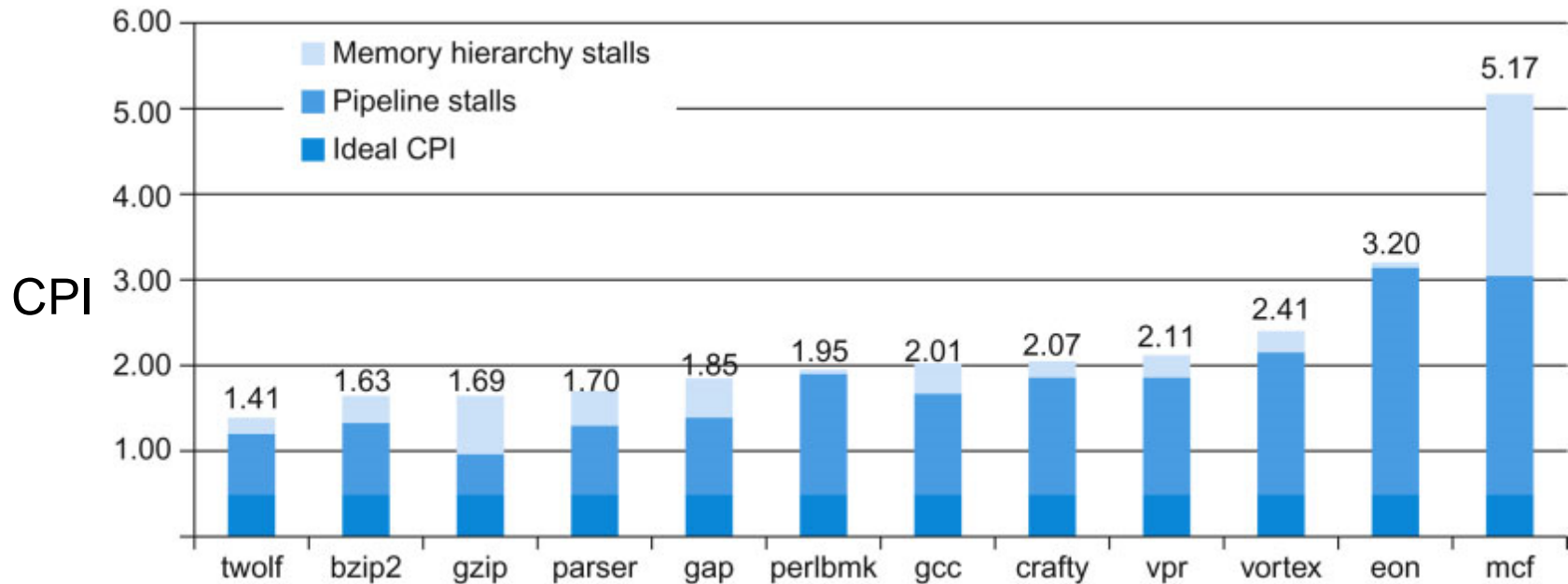
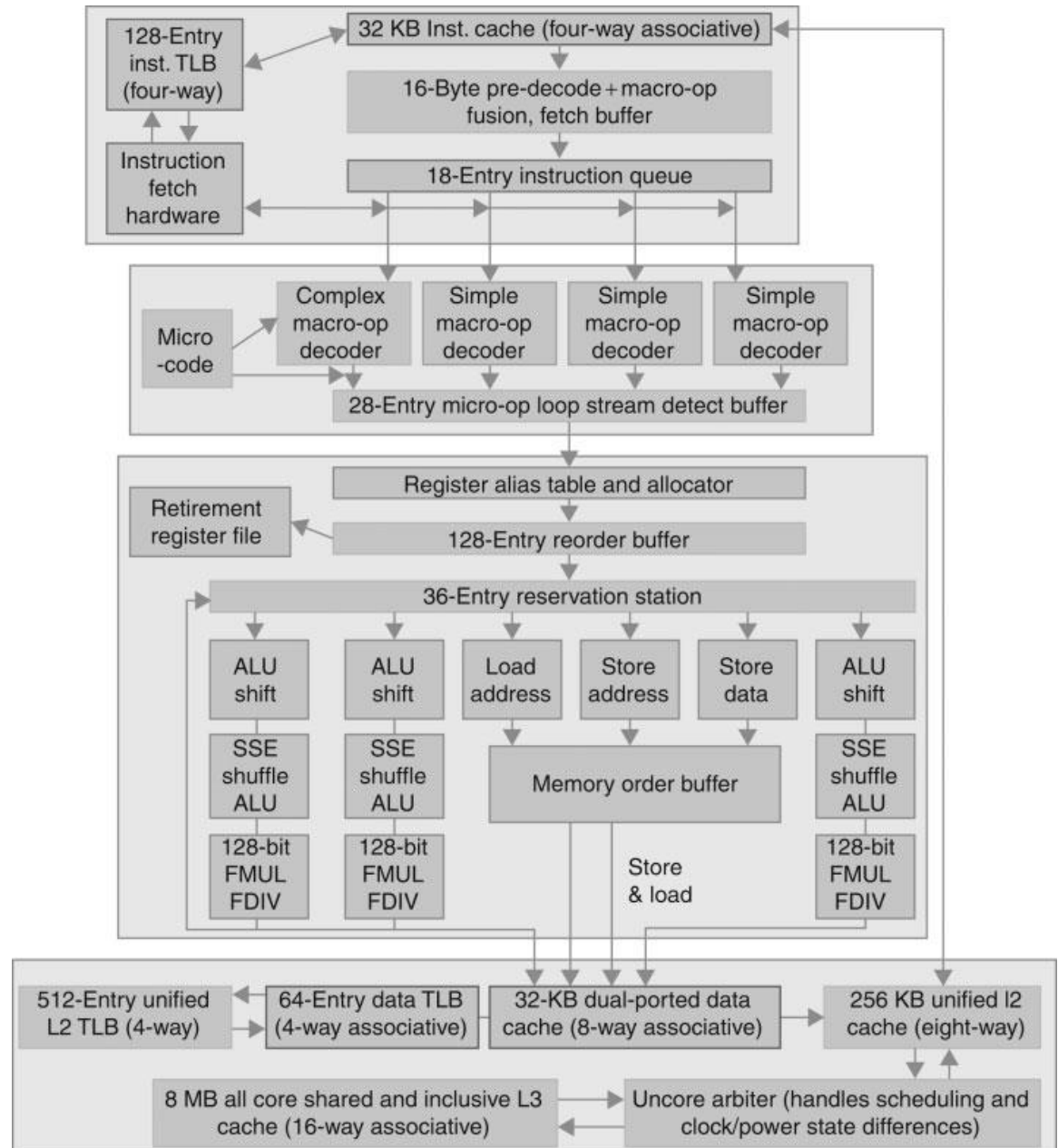


FIGURE 4.76 Patterson & Hennessy; Computer Organization & Design – 5th Edition, Elsevier, 2013
CPI on ARM Cortex A8 for the Minnespec benchmarks, which are small versions of the SPEC2000 benchmarks.

Intel Core i7 920

[FIGURE 4.77 – Patterson & Hennessy;
Computer Organization & Design
5th Edition, Elsevier, 2013]



Intel Core i7 920 - Desempenho

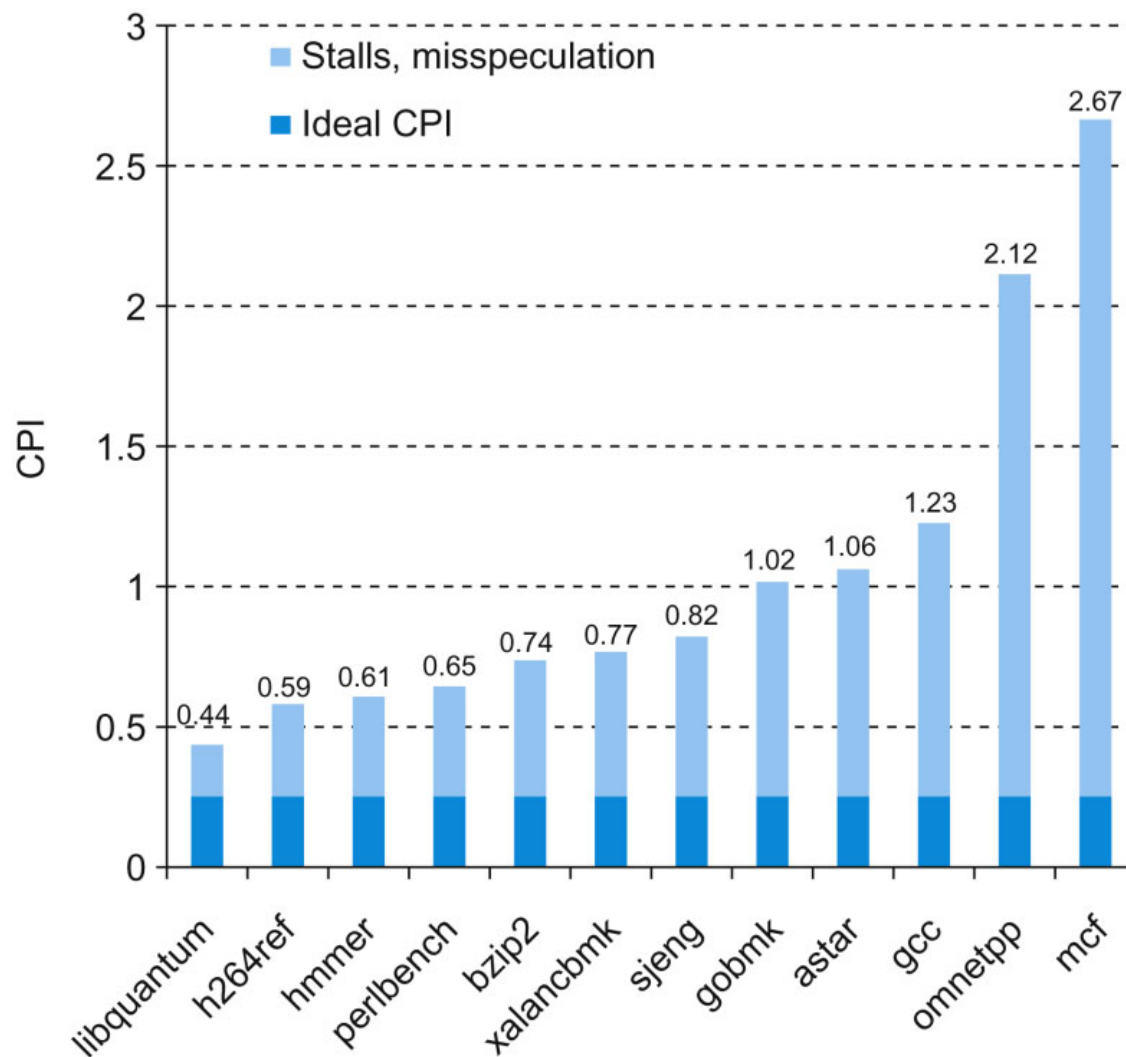


FIGURE 4.78 CPI of Intel Core i7 920 running SPEC2006 integer benchmarks.