

MC542

Organização de Computadores Teoria e Prática

2007

Prof. Paulo Cesar Centoducatte

ducatte@ic.unicamp.br

www.ic.unicamp.br/~ducatte

MC542

Arquitectura de Computadores

Micro-Arquitectura Pipeline

"DDCA" - (Capítulo #)

"FDL" - (Capítulo #)

"COD" - (Capítulo #)

Micro-Arquitetura Pipeline

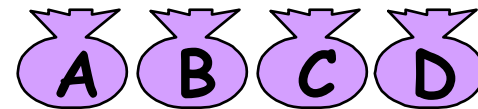
Sumário

- **Introdução**
 - Execução Pipeline
- **MIPS Pipeline**
 - 5 estágios
 - MIPS Pipelined
 - Execução de Instruções no MIPS Pipeline
 - DataPath Single-Cycle e Pipelining
 - Controle do Pipeline
- **Limites de Pipelining**
 - Hazards
 - » Estrutura
 - » Dado
 - » Controle
- **Como Tratar os Hazards de Dados**

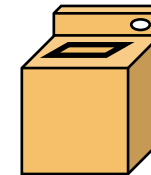
Pipelining - Conceito

- Exemplo: Lavanderia

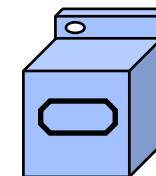
- 4 trouxas para serem lavadas



- Lavar: 30 minutos



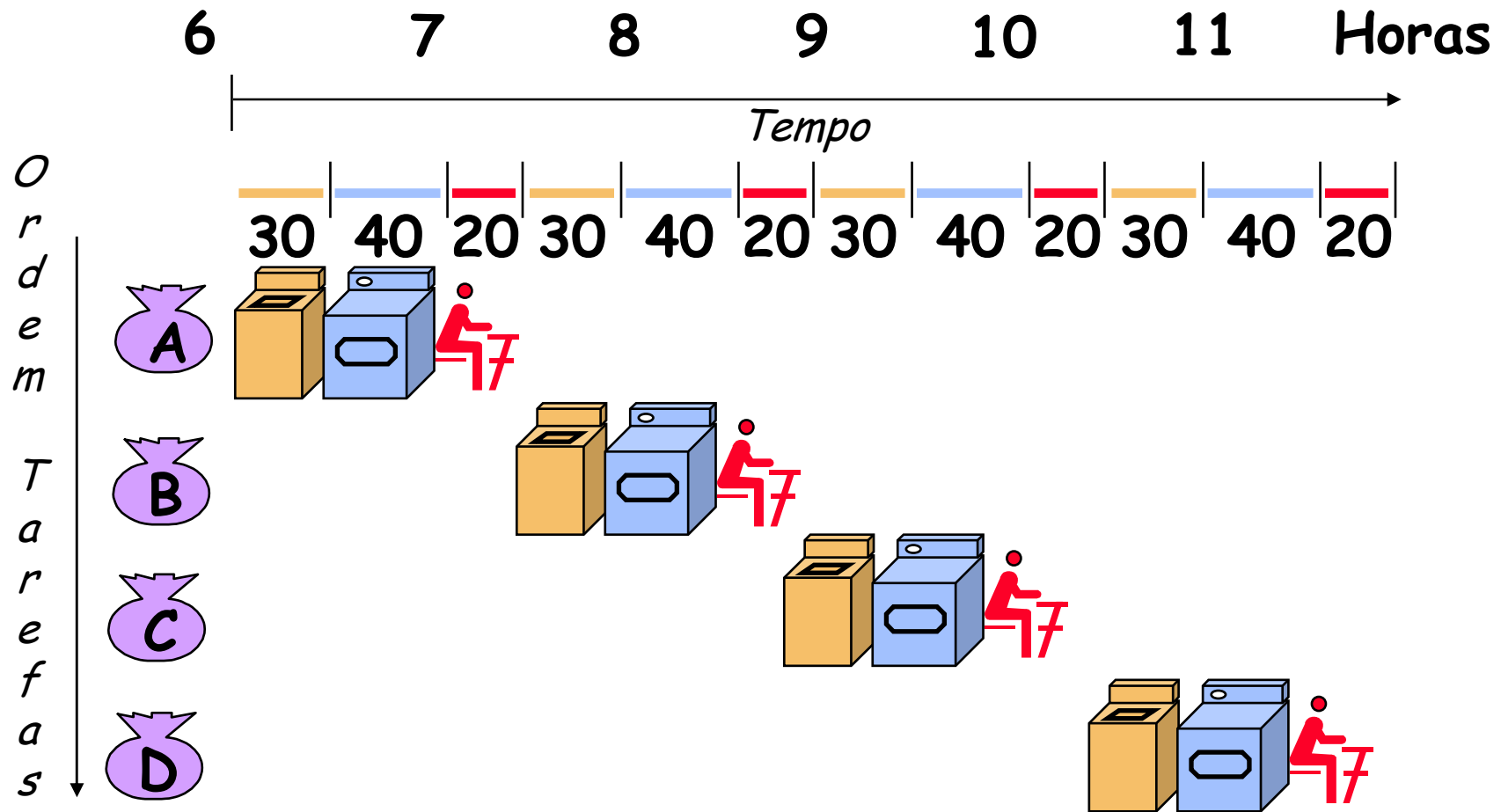
- Secar: 40 minutos



- Passar: 20 minutos

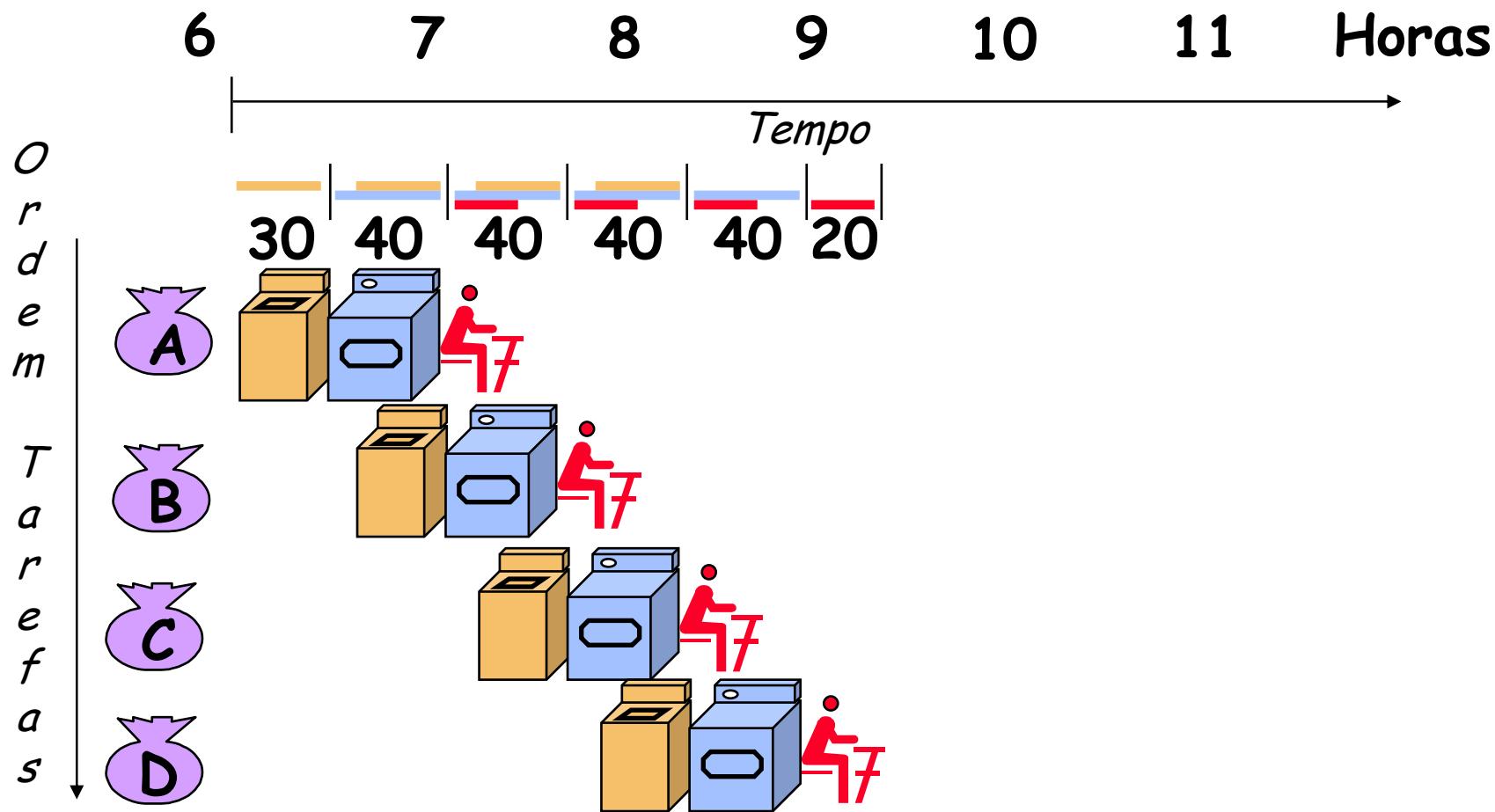


Lavanderia Seqüencial



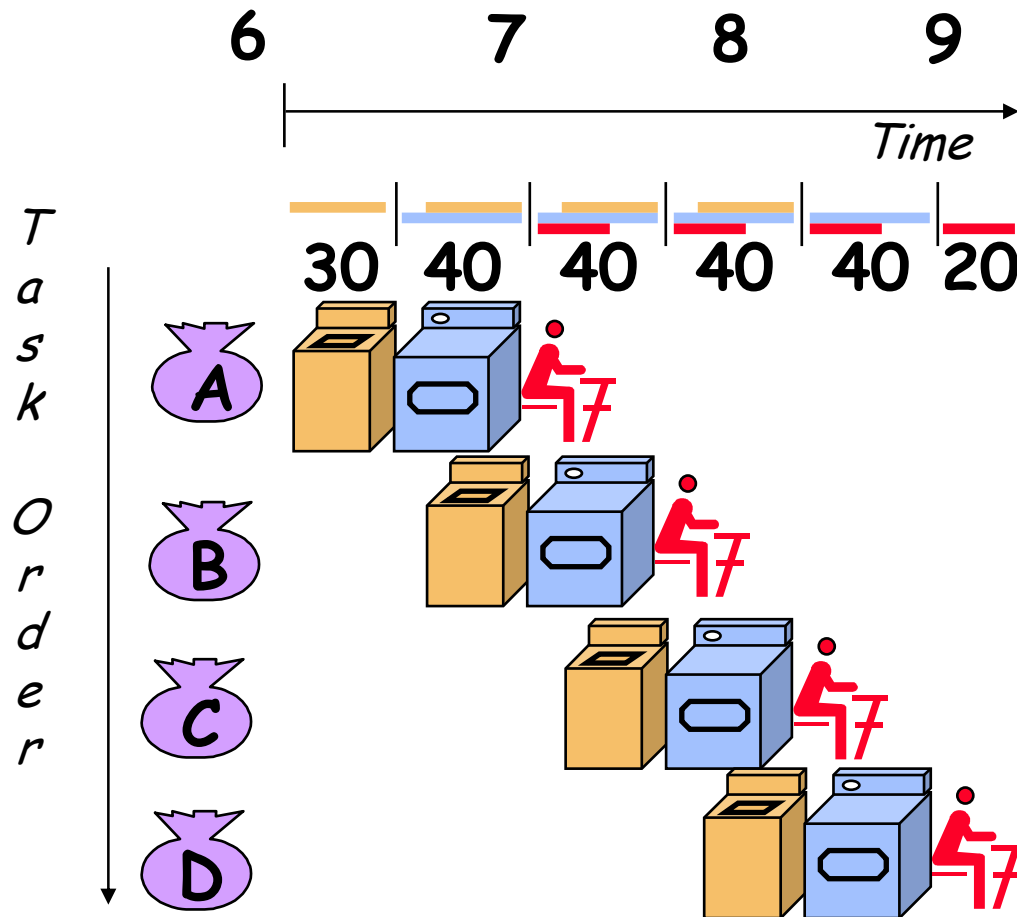
- Lavanderia seqüencial: 6 horas para lavar 4 trouxas
- Se for usado pipelining, quanto tempo?

Lavanderia Pipelined



- Lavanderia Pipelined: 3.5 horas para 4 trouxas

Pipelining



- O Pipelining não ajuda na **latência** de uma tarefa, ajuda no **throughput** de toda a carga de trabalho
- O período do Pipeline é limitado pelo estágio mais **lento**
- **Múltiplas** tarefas simultâneas
- Speedup potencial = **Número de estágios**
- Estágios não balanceados reduzem o speedup
- O Tempo de "**preenchimento**" e de "**esvaziamento**" reduzem o speedup

CPU Pipeline

- Executam bilhões de instruções: *throughput*
- Características desejáveis em um conjunto de instruções (ISA) para pipelining?
 - Instruções de tamanho variável vs. Todas instruções do mesmo tamanho?
 - Operandos em memória em qq operação vs. operandos em memória somente para **loads** e **stores**?
 - Formato das instruções irregular vs. formato regular das instruções (i.e. Operandos nos mesmos lugares)?

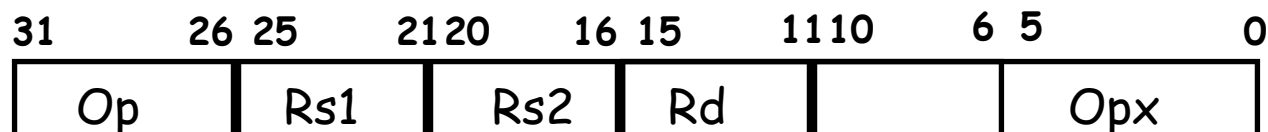
Um RISC Típico

- Formato de instruções de 32-bit (3 formatos)
- Acesso à memória somente via instruções **load/store**
- 32 GPR de 32-bits (R0 contém zero)
- Instruções aritméticas: 3-address, reg-reg, registradores no mesmo lugar
- Modo de endereçamento simples para **load/store** (**base + displacement**)
 - Sem indireção
- Condições simples para o branch
- **Delayed branch**

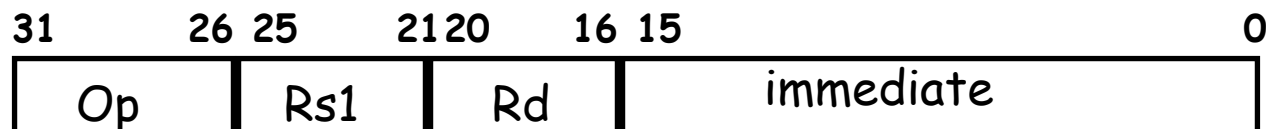
SPARC, MIPS, HP PA-Risc, DEC Alpha, IBM PowerPC,
CDC 6600, CDC 7600, Cray-1, Cray-2, Cray-3

Exemplo: MIPS (Localização dos regs)

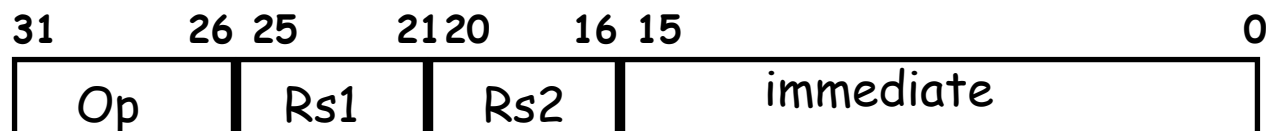
Register-Register



Register-Immediate



Branch



Jump / Call

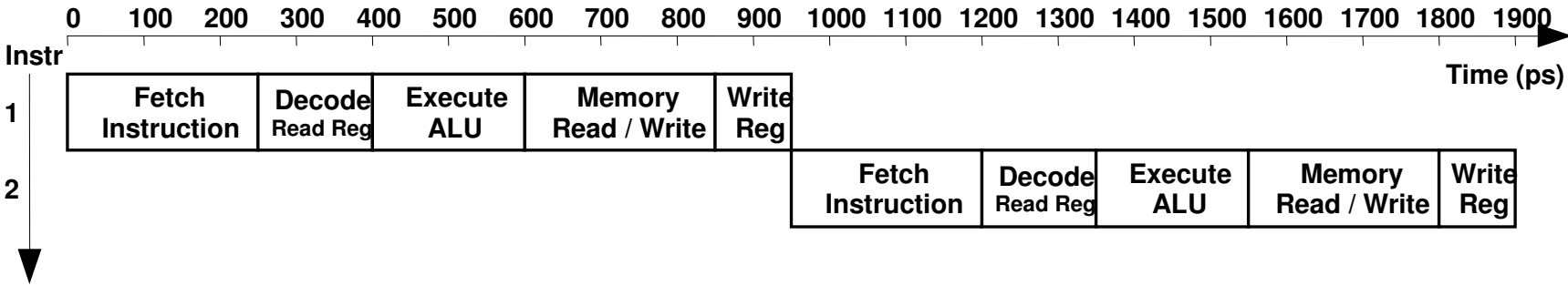


Processador MIPS Pipelined

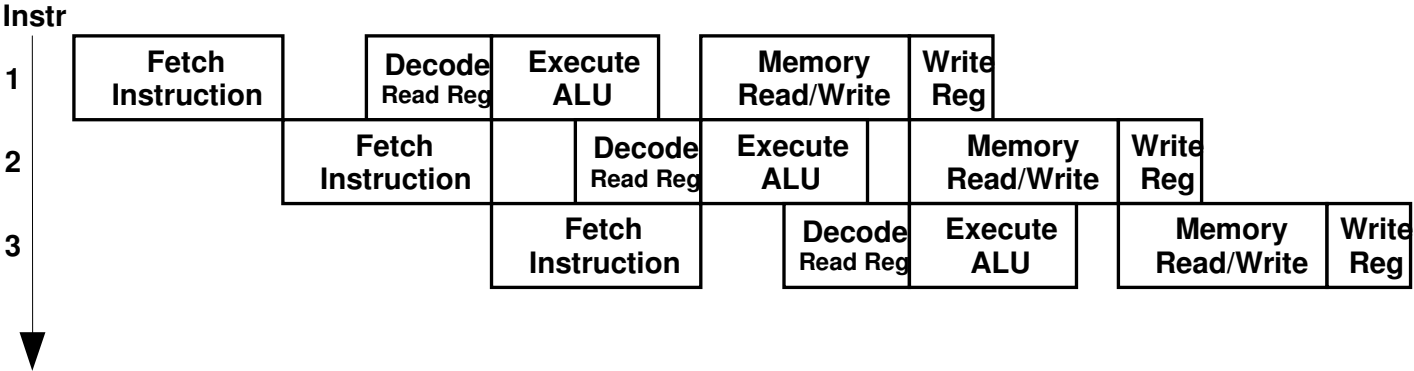
- Paralelismo Temporal
- Divide o processador single-cycle em 5 estágios:
 - Fetch
 - Decode
 - Execute
 - Memory
 - Writeback
- Adicionar registradores de pipeline entre os estágios

Processador MIPS Pipelined

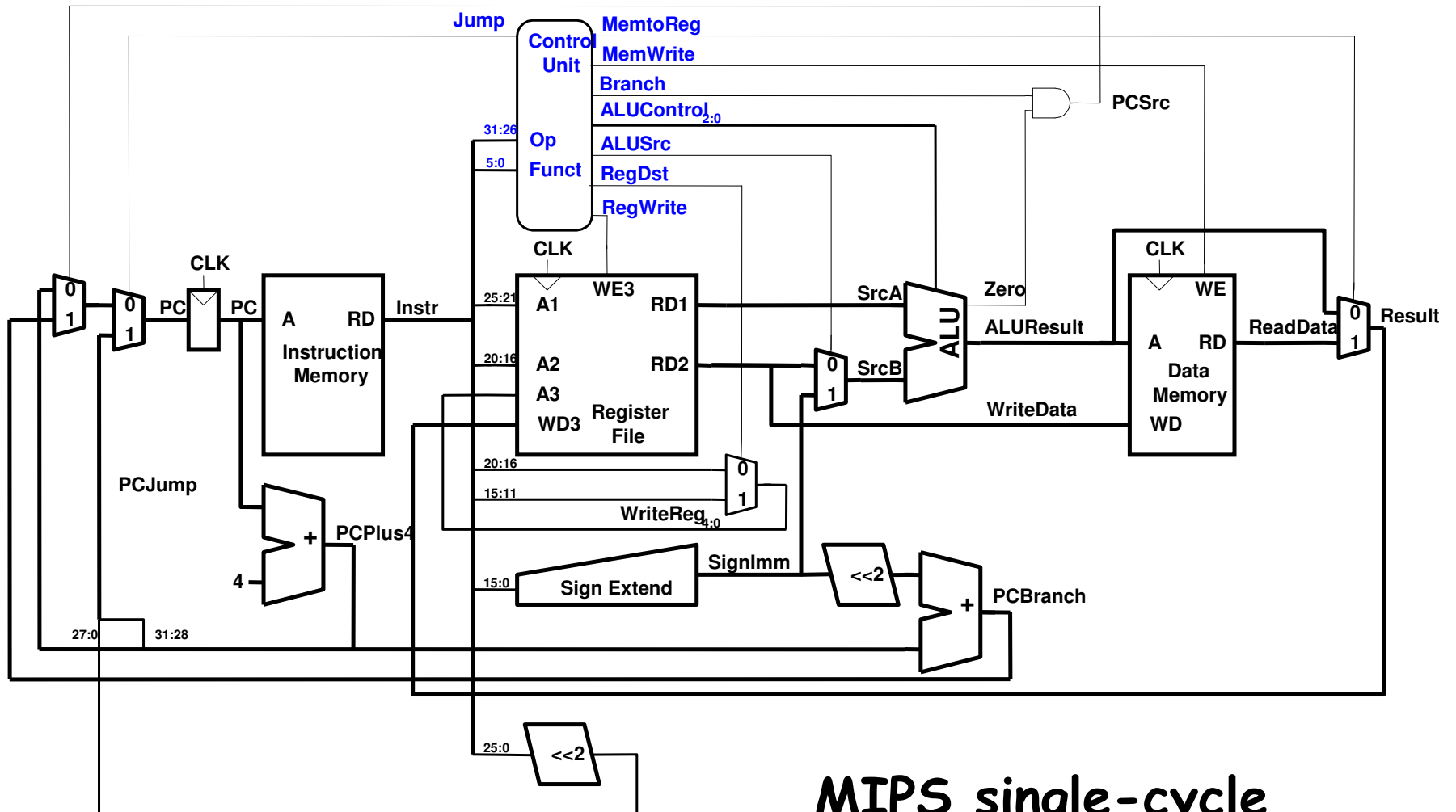
Single-Cycle



Pipelined

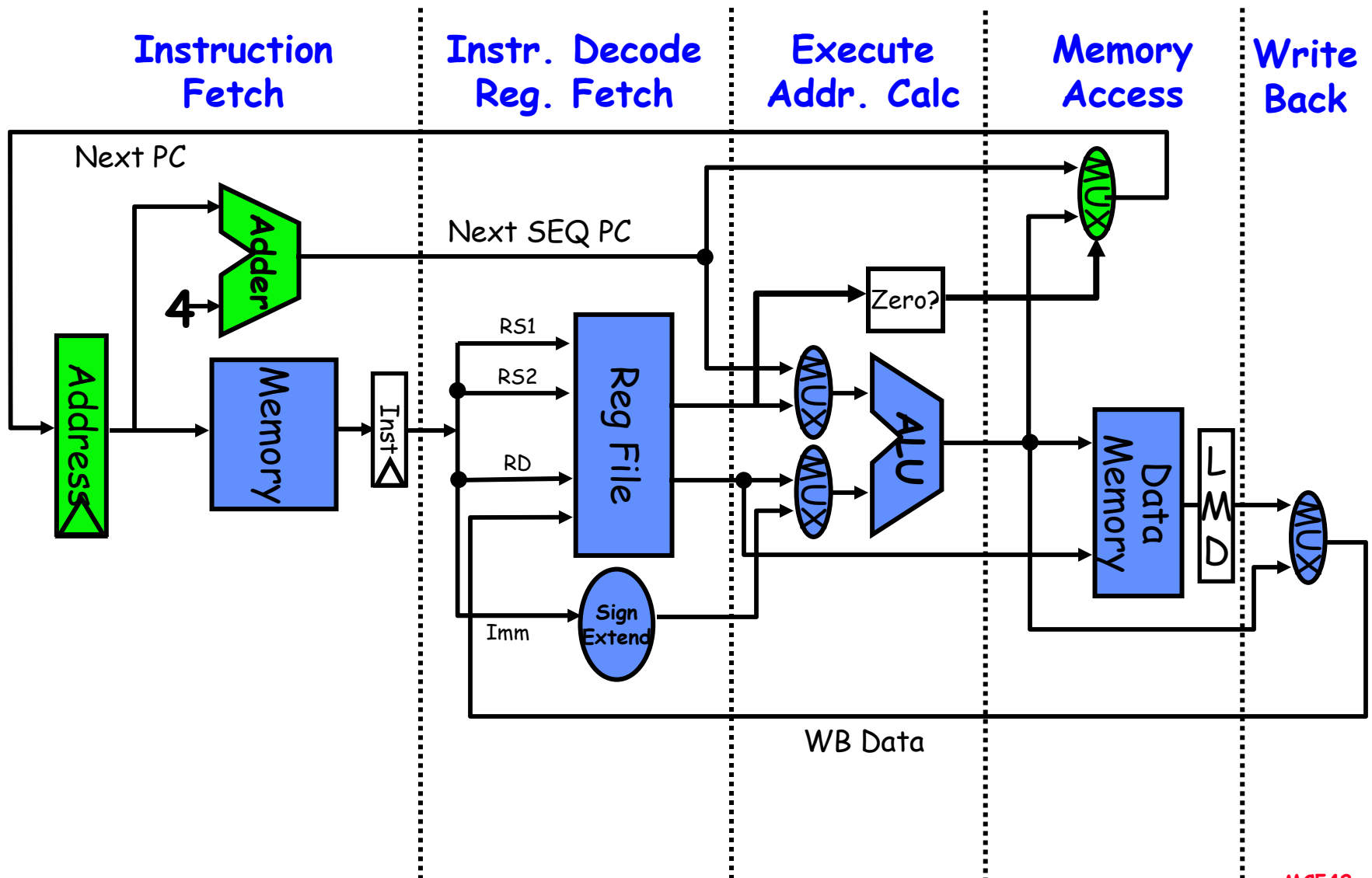


Processador MIPS Pipelined



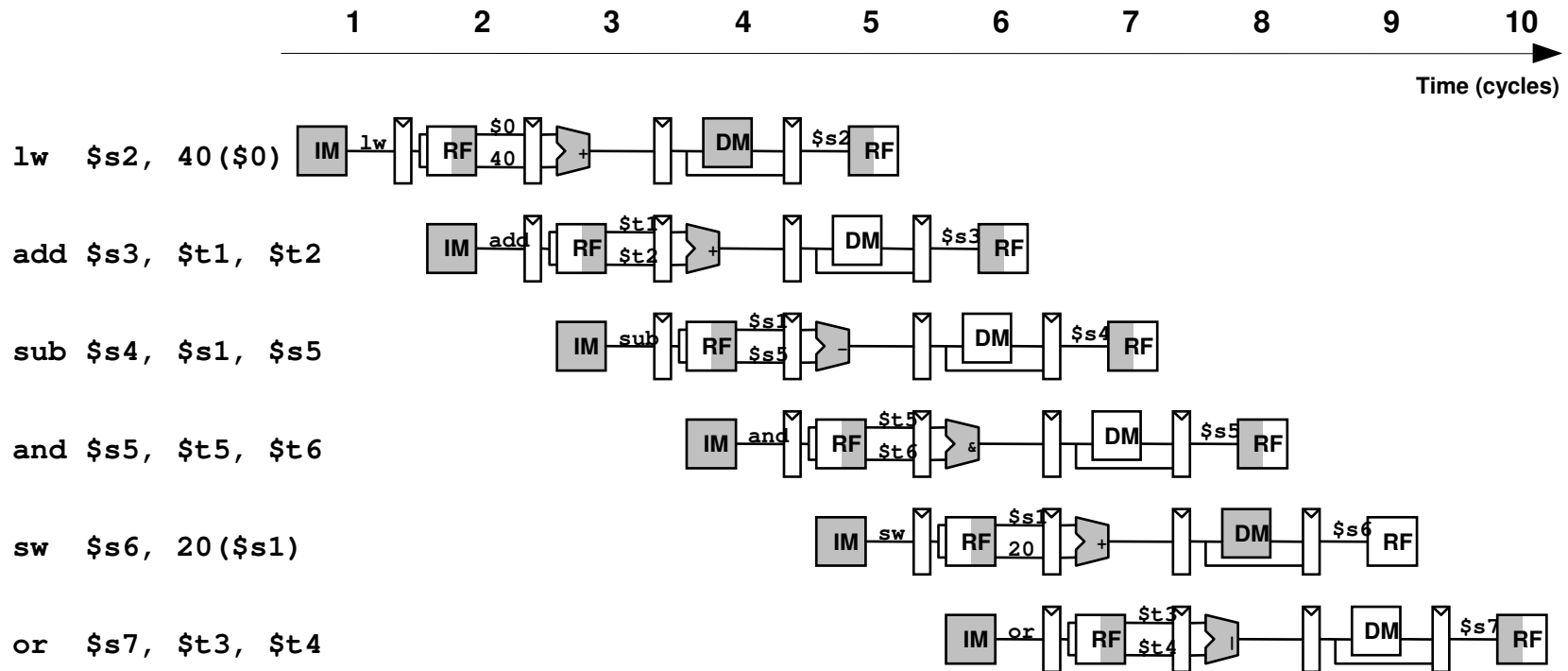
MIPS single-cycle

Processador MIPS Pipelined



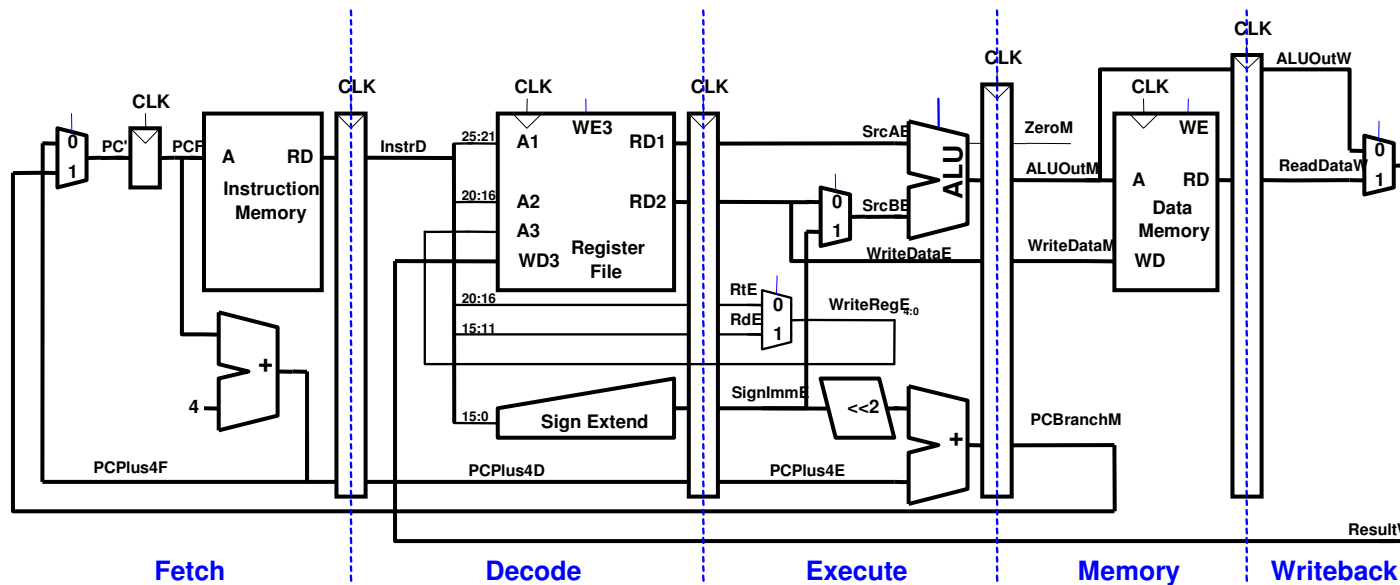
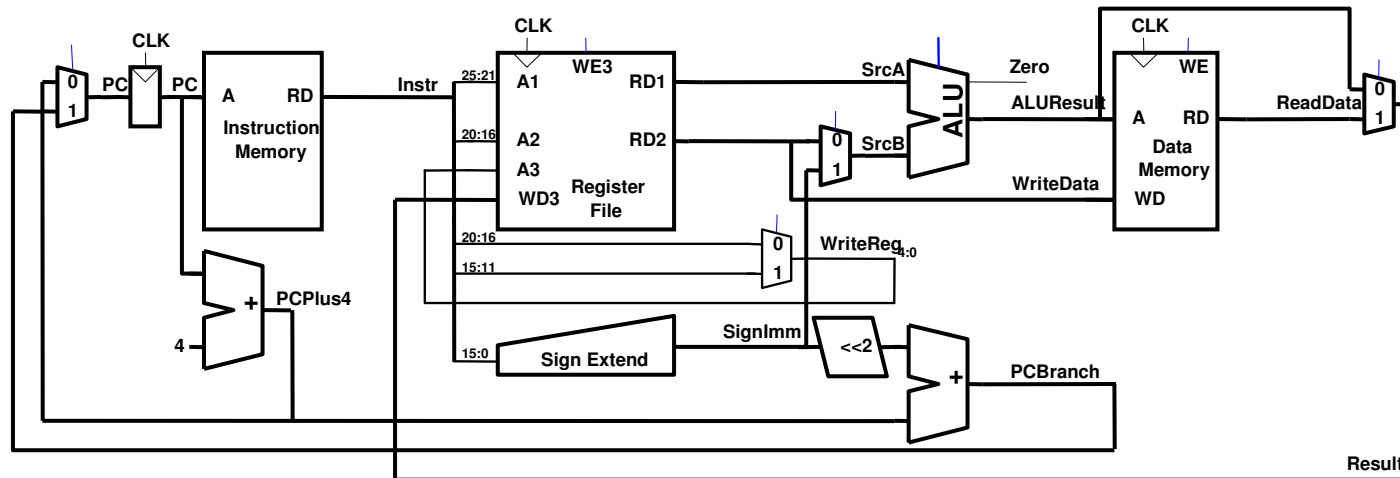
Processador MIPS Pipelined

- Abstração da execução Pipeline

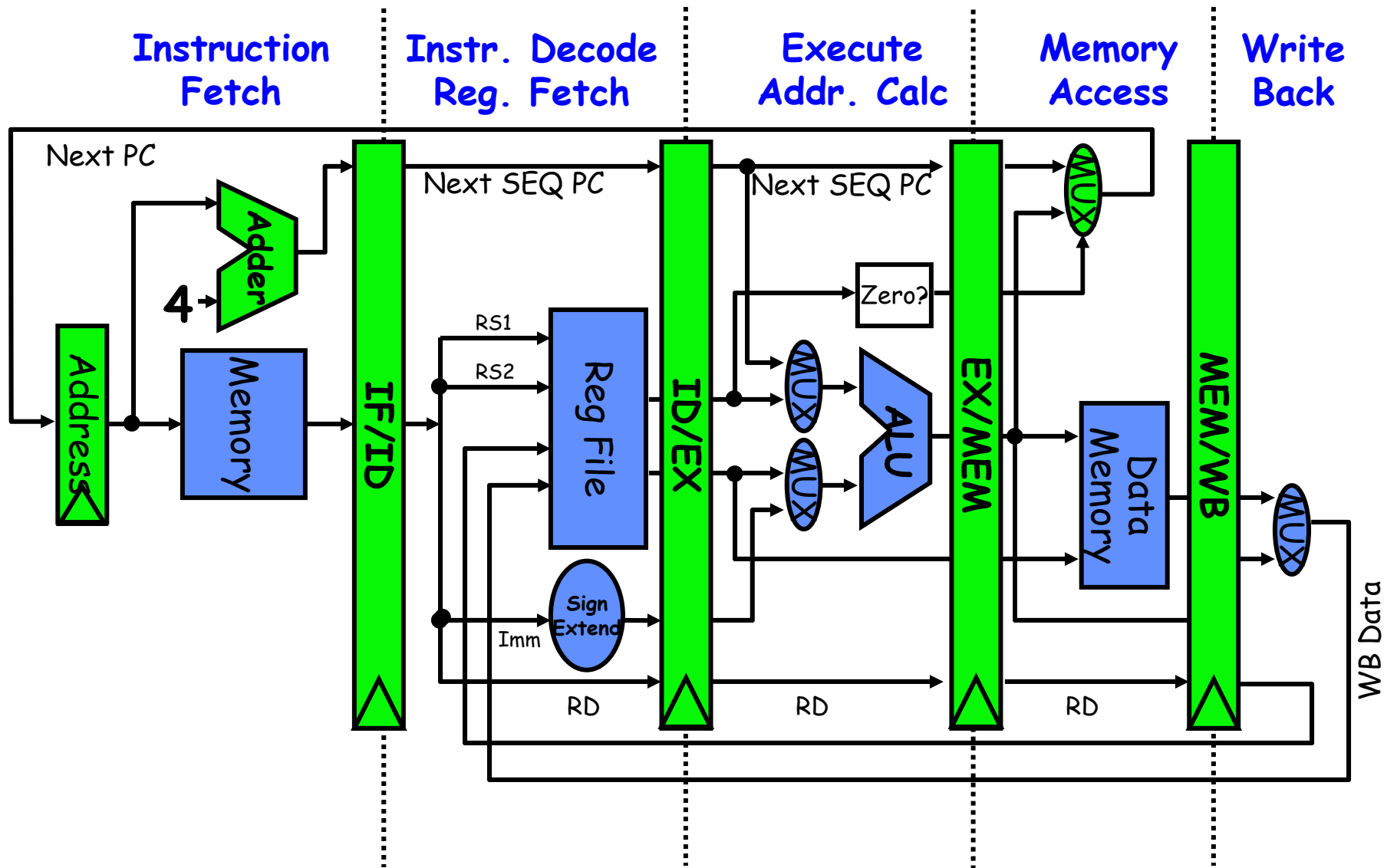


Processador MIPS Pipelined

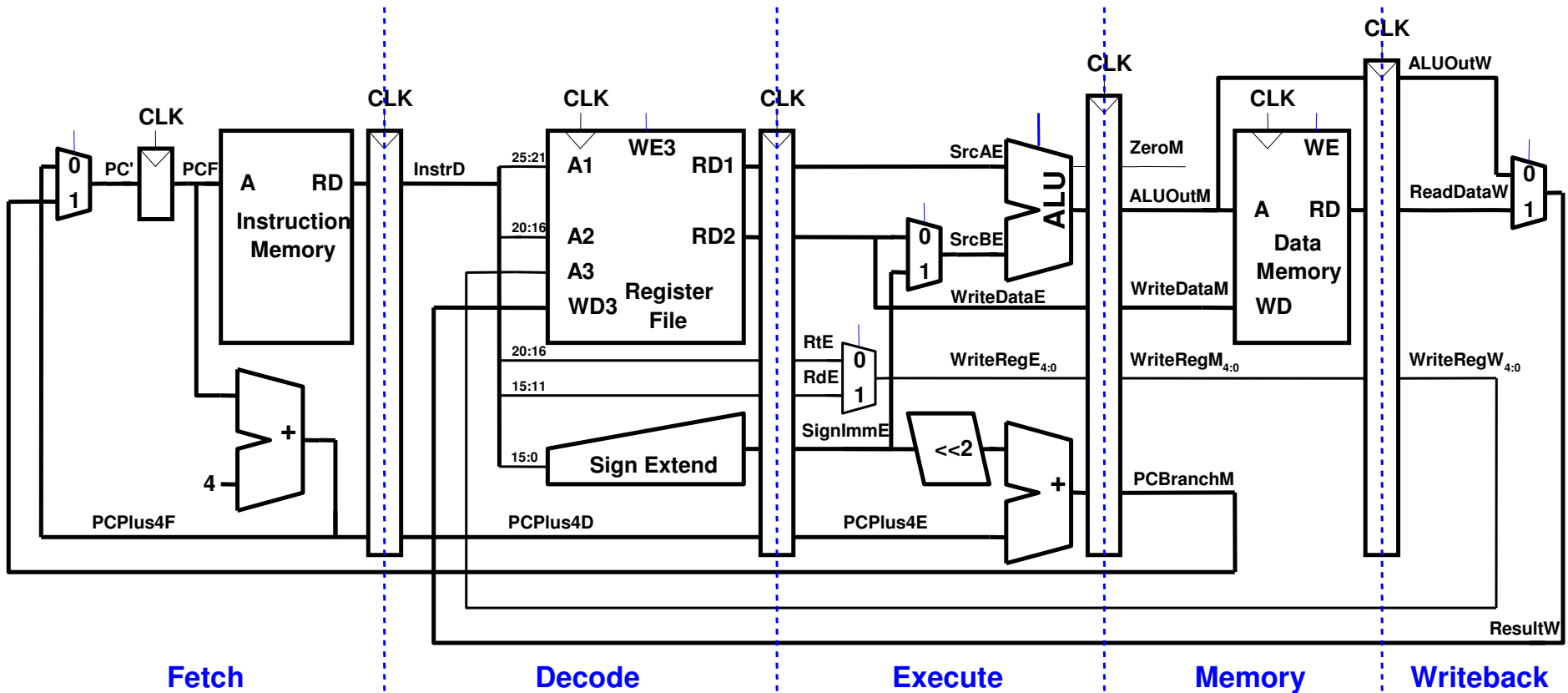
- DataPath Single-Cycle e Pipelining



Processador MIPS Pipelined

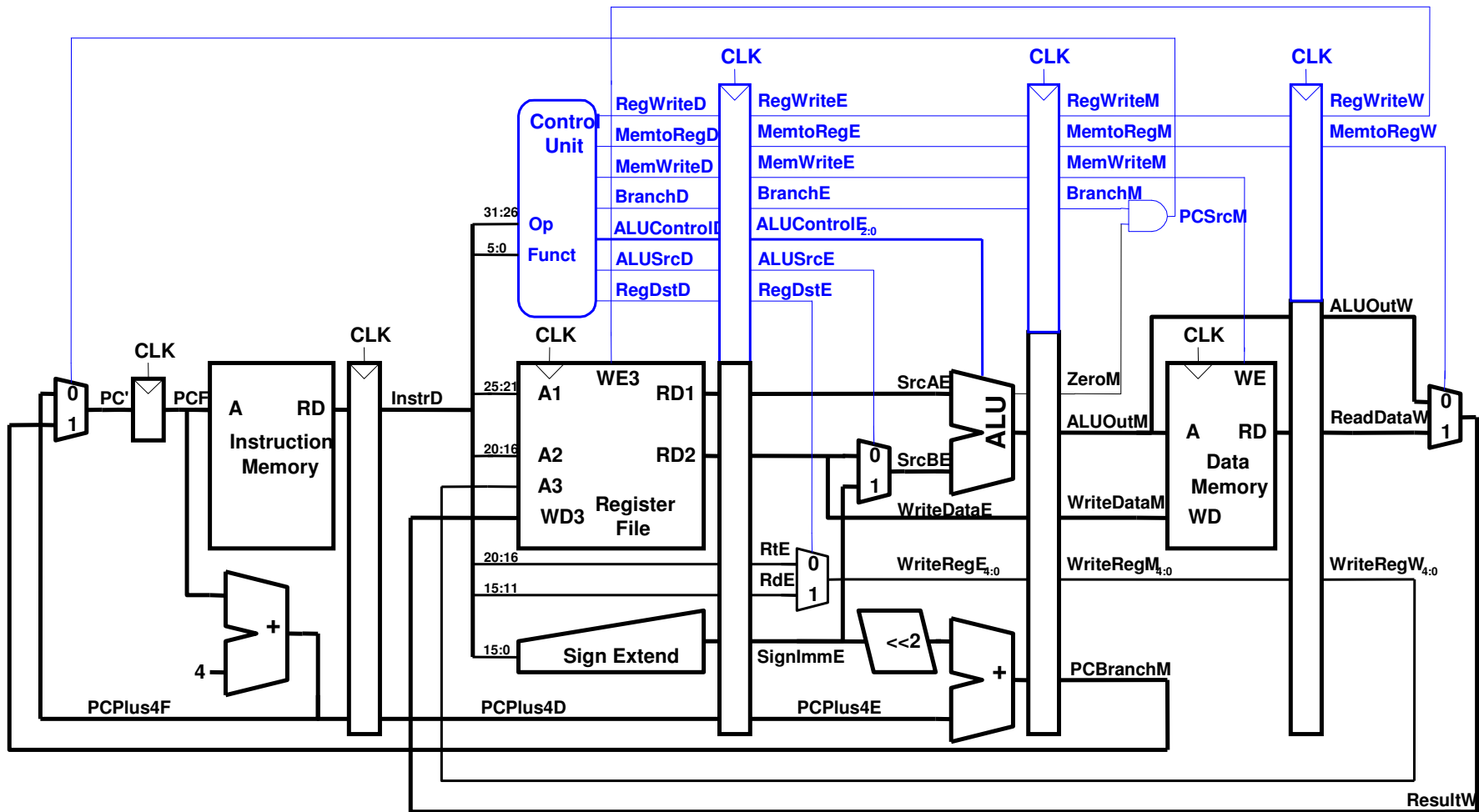


Processador MIPS Pipelined



Processador MIPS Pipelined

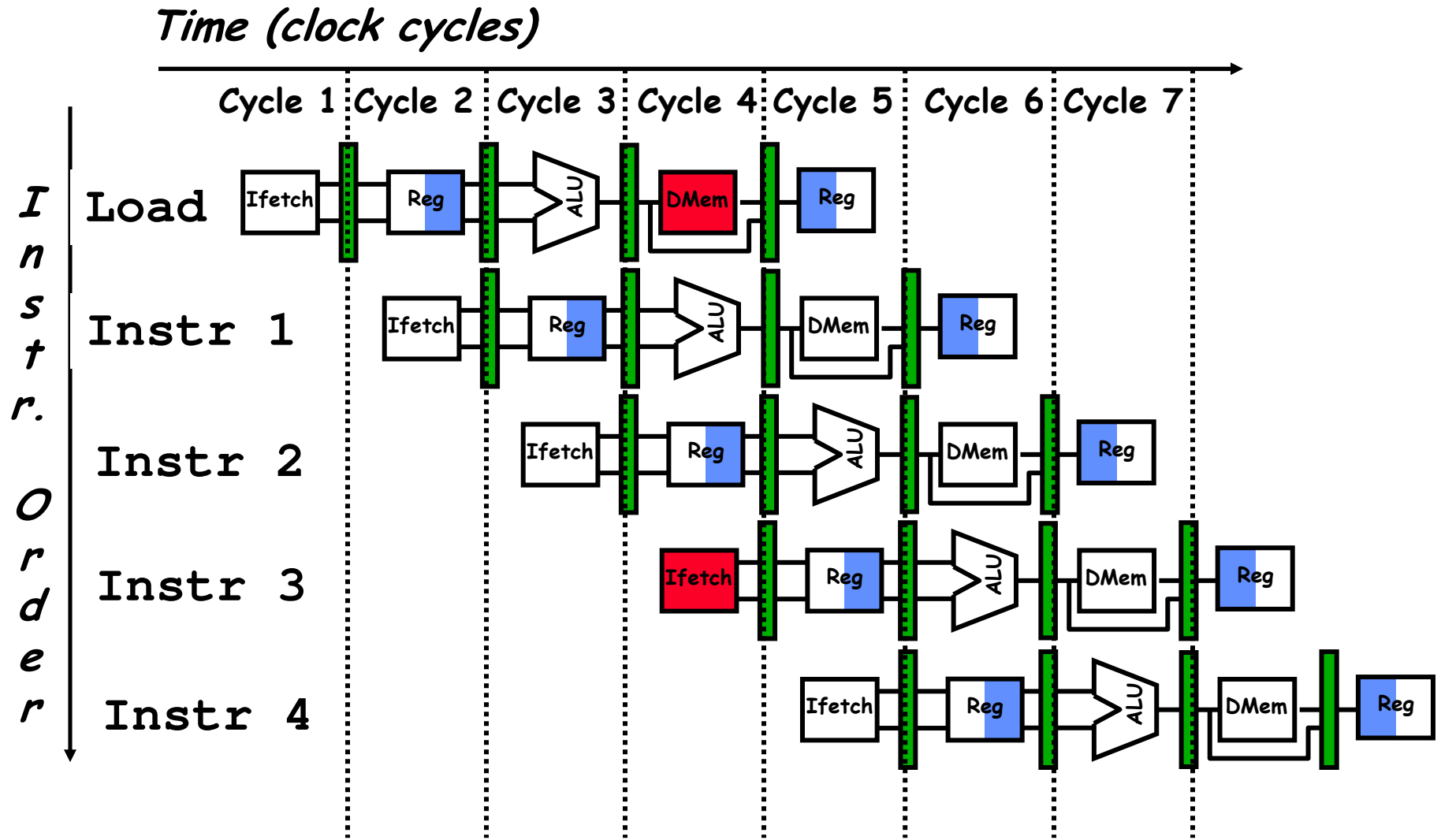
- Controle do Pipeline



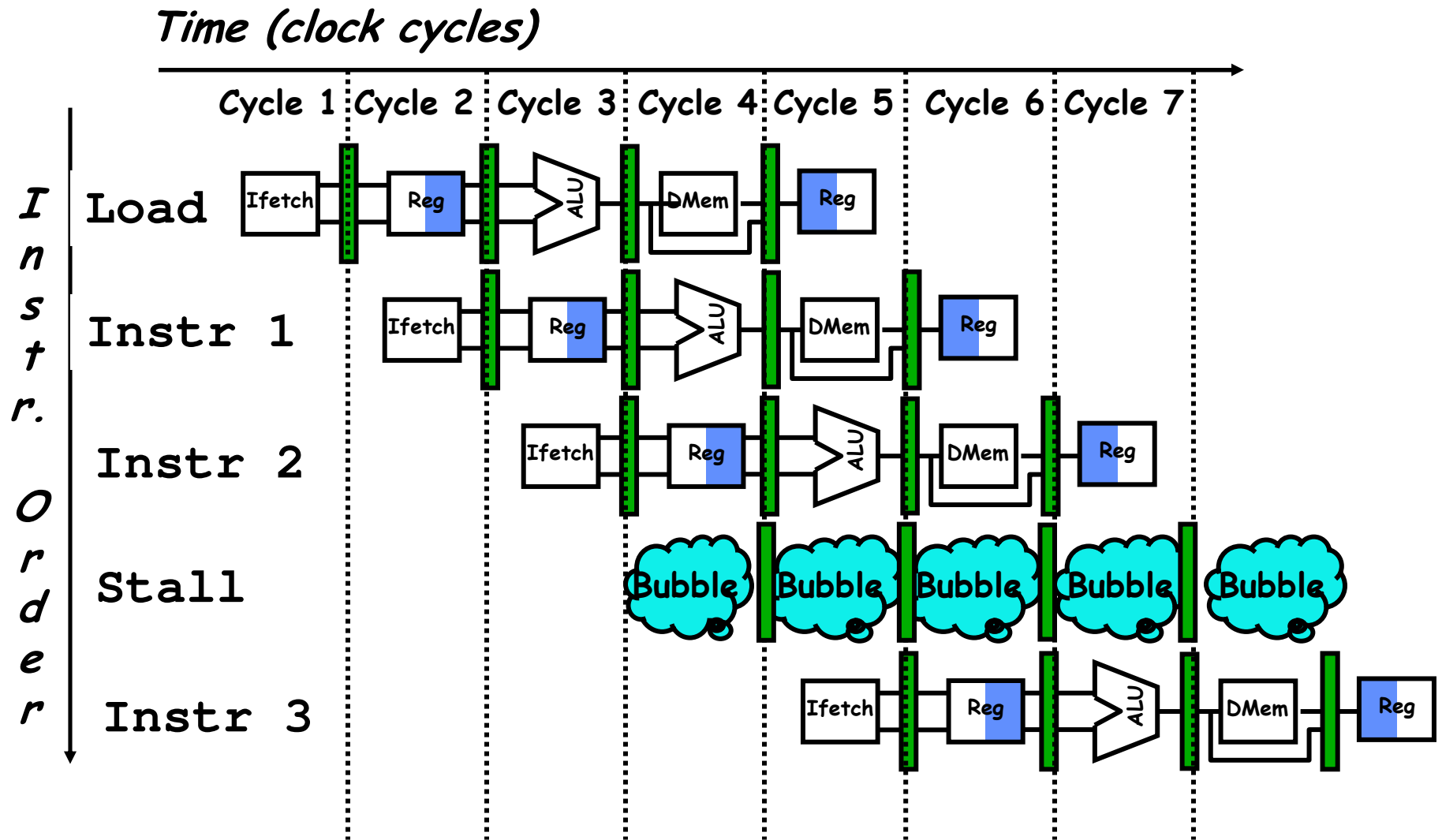
Limites de Pipelining

- **Hazards:** impedem que a próxima instrução seja executada no ciclo de clock “previsto” para ela
 - **Structural hazards:** O HW não suporta uma dada combinação de instruções
 - **Data hazards:** Uma Instrução depende do resultado da instrução anterior que ainda está no pipeline
 - **Control hazards:** Causado pelo **delay** entre o **fetching** de uma instrução e a decisão sobre a mudança do fluxo de execução (**branches** e **jumps**).

Memória Única (D/I) - Structural Hazards



Memória Única (D/I) - Structural Hazards



Data Hazards

- Read After Write (RAW)

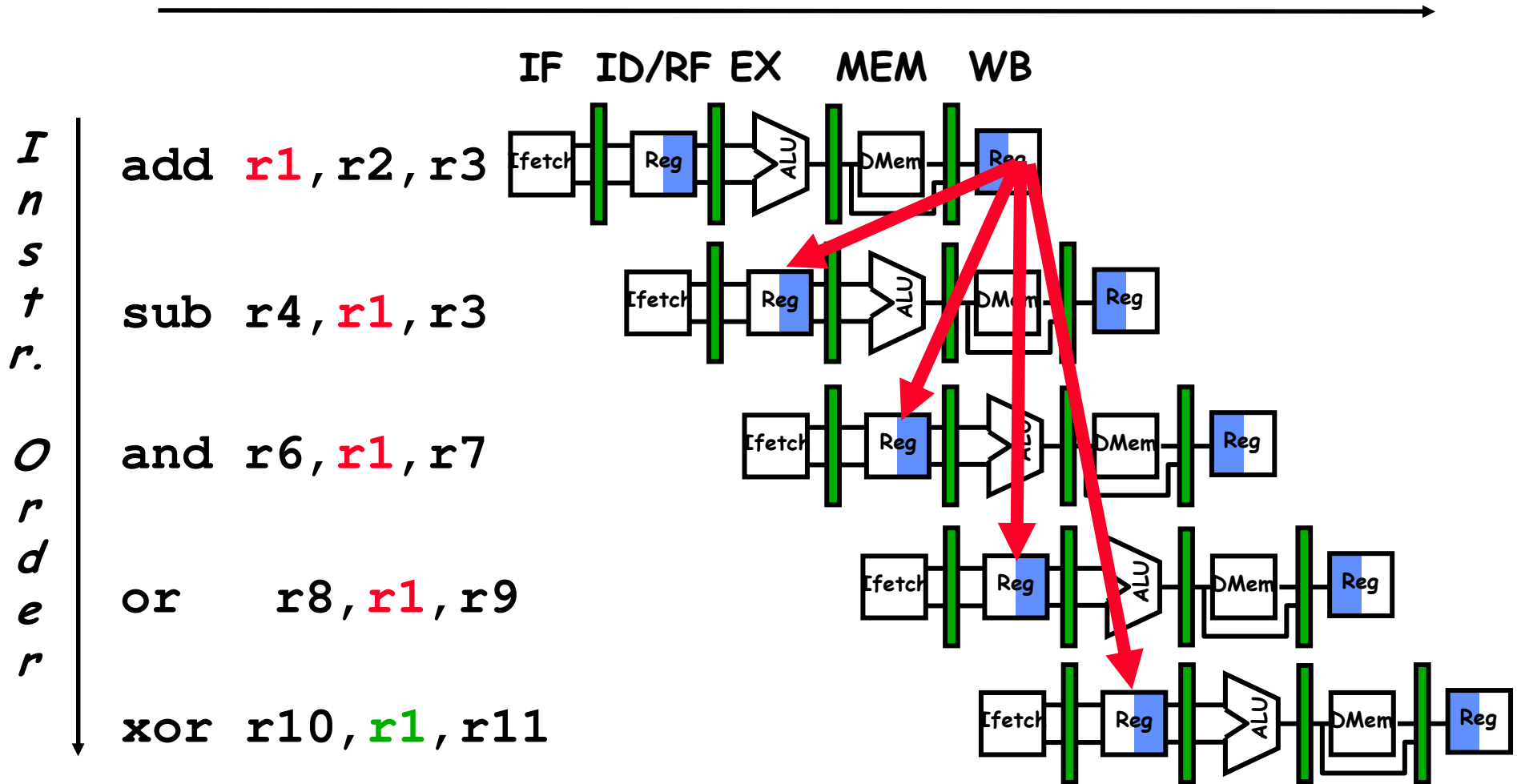
Instr_J lê o operando antes da Instr_I escreve-lo

 I: add **r1**, r2, r3
J: sub r4, **r1**, r3

- Causada por uma “**Dependência**” (nomenclatura de compiladores).

Data Hazard em R1


Time (clock cycles)



Data Hazards

- **Write After Read (WAR)**

Instr_J escreve o operando antes que a Instr_I o leia

 I: sub r4, r1, r3
J: add r1, r2, r3
K: mul r6, r1, r7

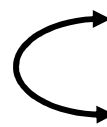
- Chamada “**anti-dependência**” (nomenclatura de compiladores). Devido ao reuso do nome “r1”.
- Não ocorre no pipeline do MIPS:
 - Todas instruções usam 5 estágios, e
 - Leituras são no estágio 2, e
 - Escritas são no estágio 5

Data Hazards

- **Write After Write (WAW)**

Instr_J escreve o operando antes que a Instr_I o escreva.

```
    I: sub r1, r4, r3
    J: add r1, r2, r3
    K: mul r6, r1, r7
```



- Chamada “**dependência de saída**” (nomenclatura de compiladores). Devido ao reuso do nome “**r1**”.
- Não ocorre no pipeline do MIPS:
 - Todas Instruções são de 5 estágios, e
 - Escritas são sempre no 5 estágio
 - (**WAR e WAW** ocorrem em pipelines mais sofisticados)

Como Tratar os Data Hazards

- Inserir instruções nops no código
- Rearranjar o código em tempo de compilação
- Stall o processador em tempo de execução (run-time)
- Forward data

Data Hazards - Solução por SW

- Compilador reconhece o **data hazard** e troca a ordem das instruções (quando possível)
- Compilador reconhece o **data hazard** e adiciona **nops**

Exemplo:

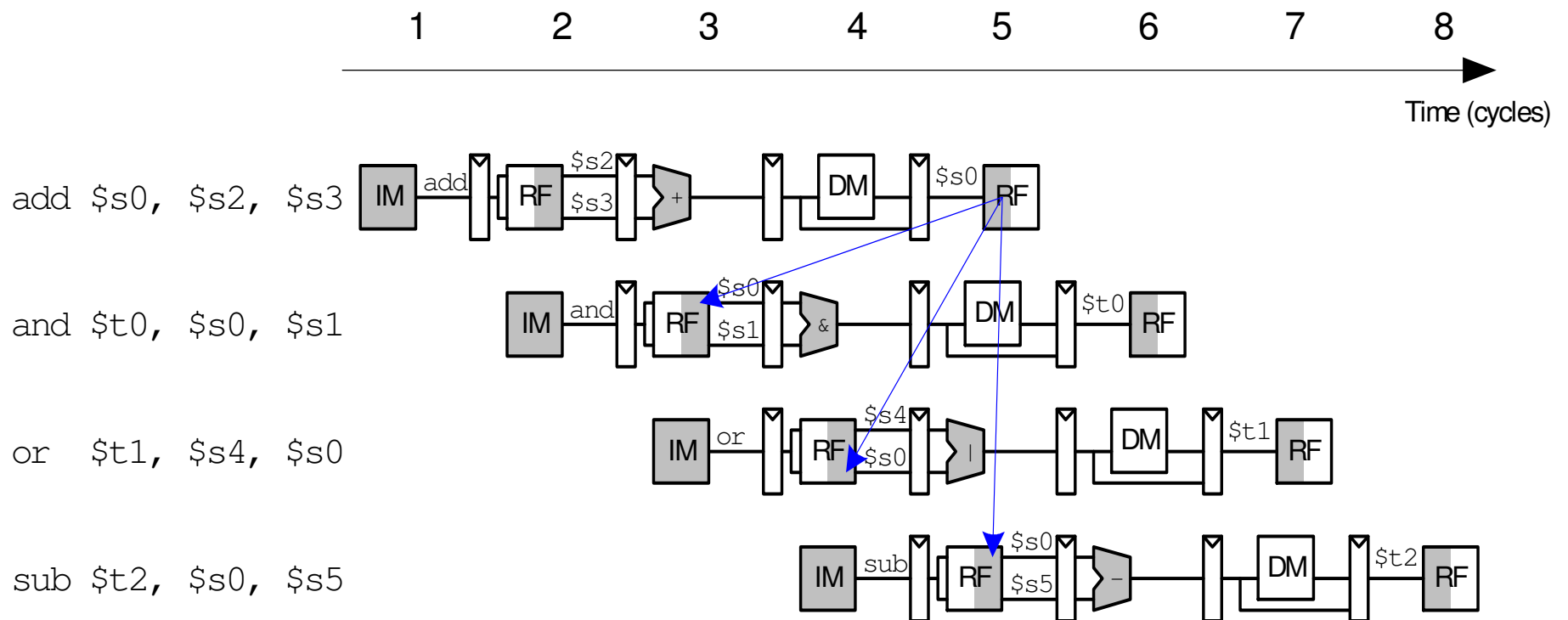
```
sub  R2, R1, R3    ; reg R2 escrito por sub
nop                ; no operation
nop
and  R12, R2, R5   ; resultado do sub disponível
or   R13, R6, R2
add  R14, R2, R2
sw   100 (R2), R15
```

Data Hazard Control: Stalls

- Hazard ocorre quando a instr. Lê (no estágio ID) um reg que será escrito, por uma instr. anterior (no estágio EX, MEM, WB)
- Solução: Detectar o hazard e parar a instrução no pipeline até o hazard ser resolvido
- Detectar o hazard pela comparação do campo **read** no IF/ID pipeline register com o campo **write** dos outros pipeline registers (ID/EX, EX/MEM, MEM/WB)
- Adicionar **bubble** no pipeline
 - Preservar o PC e o IF/ID pipeline register

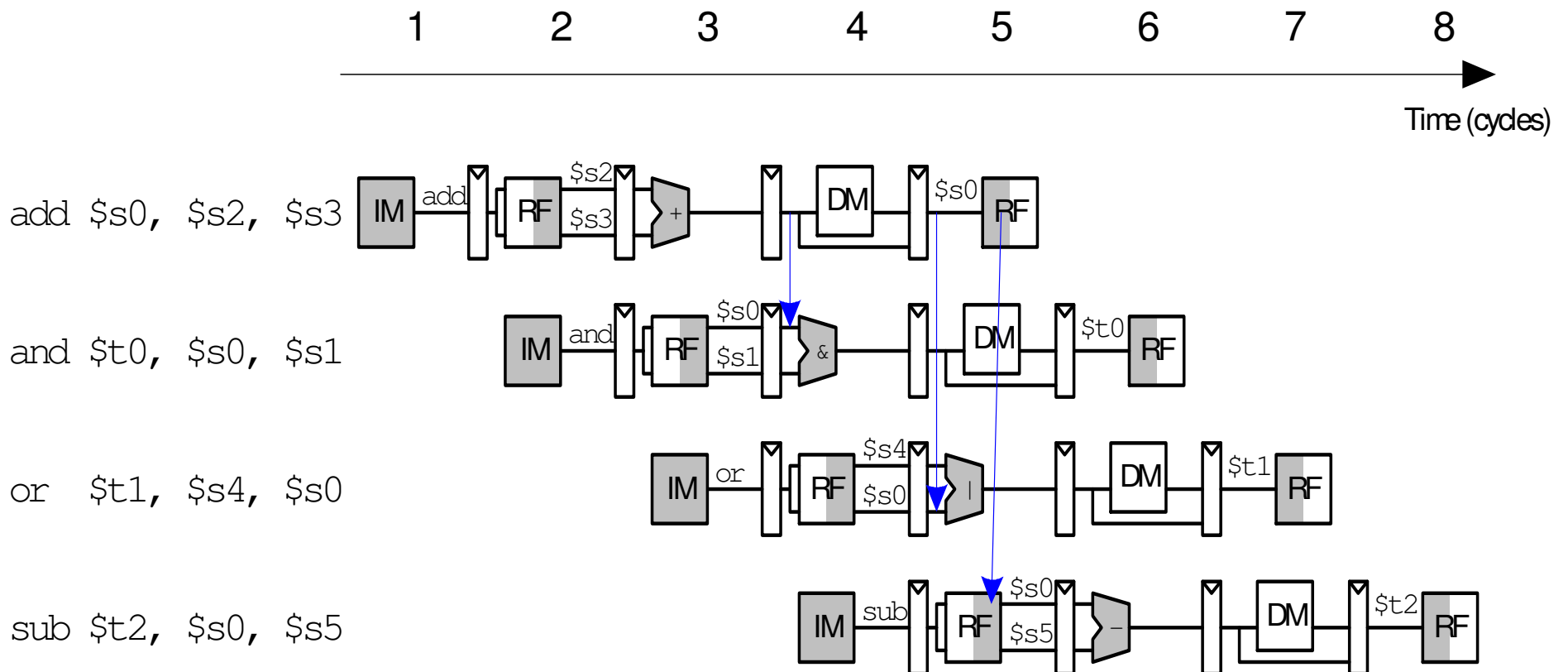
Processador MIPS Pipelined

- Data Forwarding



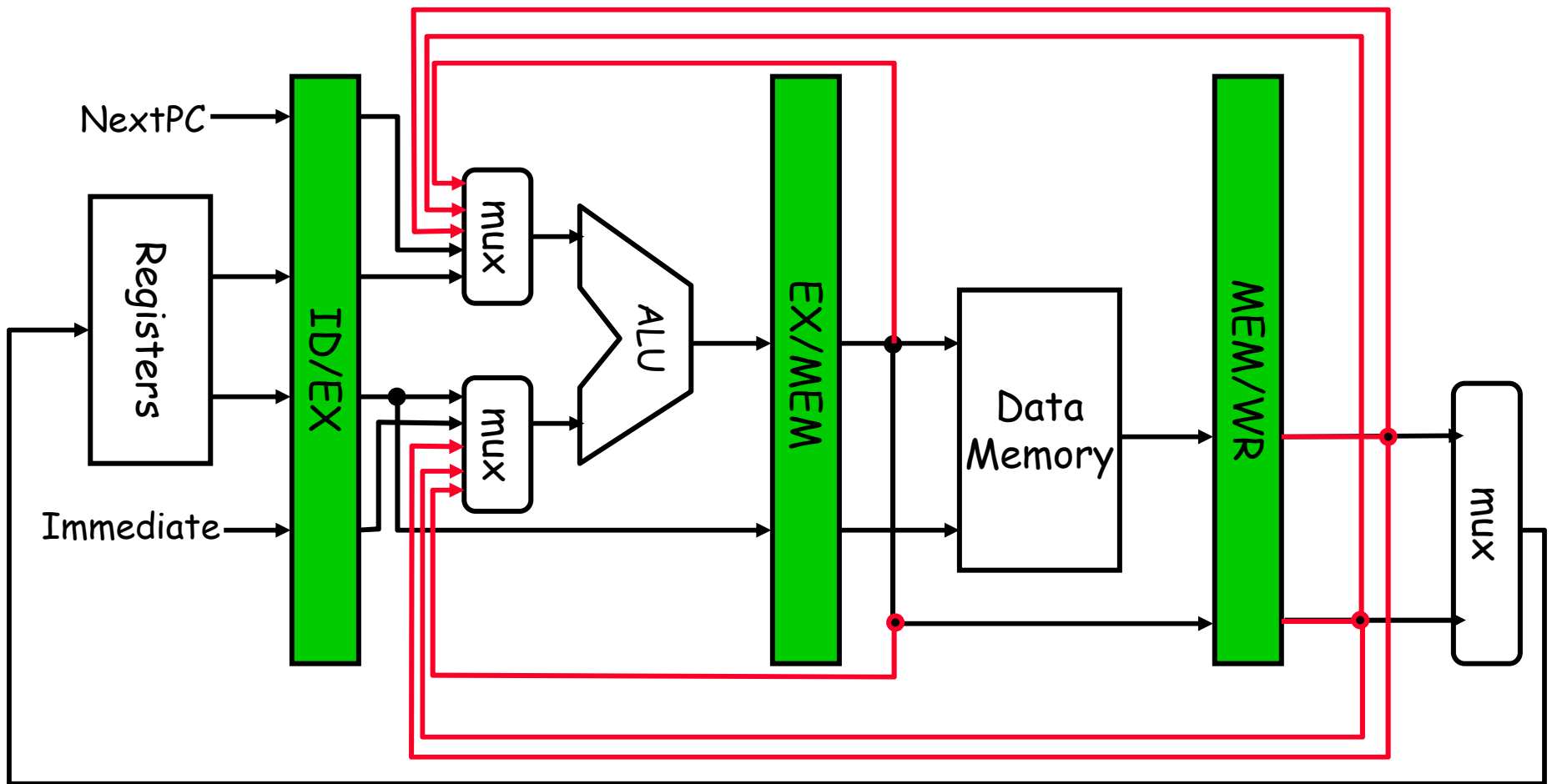
Processador MIPS Pipelined

- Data Forwarding



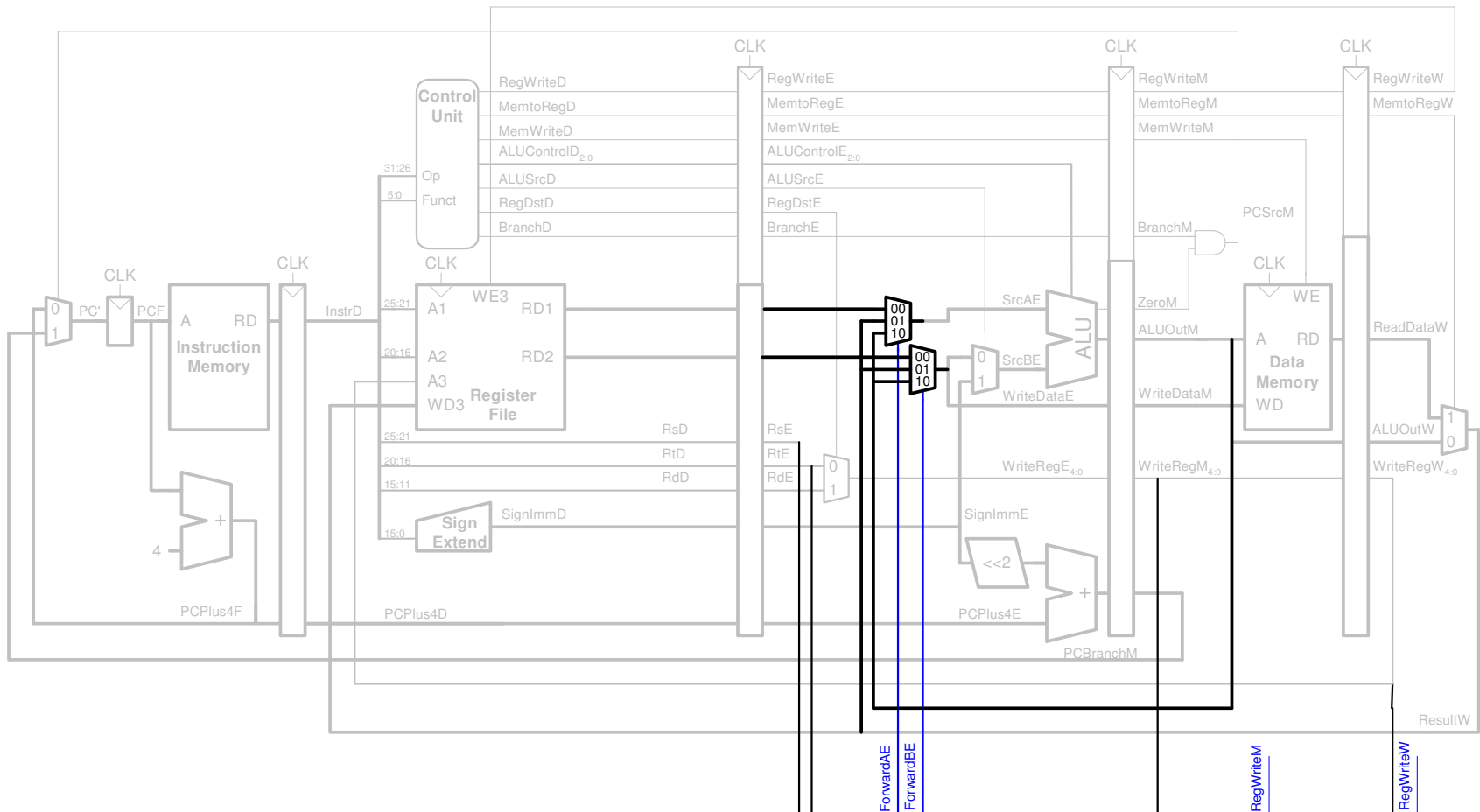
Processador MIPS Pipelined

- HW para forwarding



Processador MIPS Pipelined

- HW para forwarding



Hazard Unit

Processador MIPS Pipelined

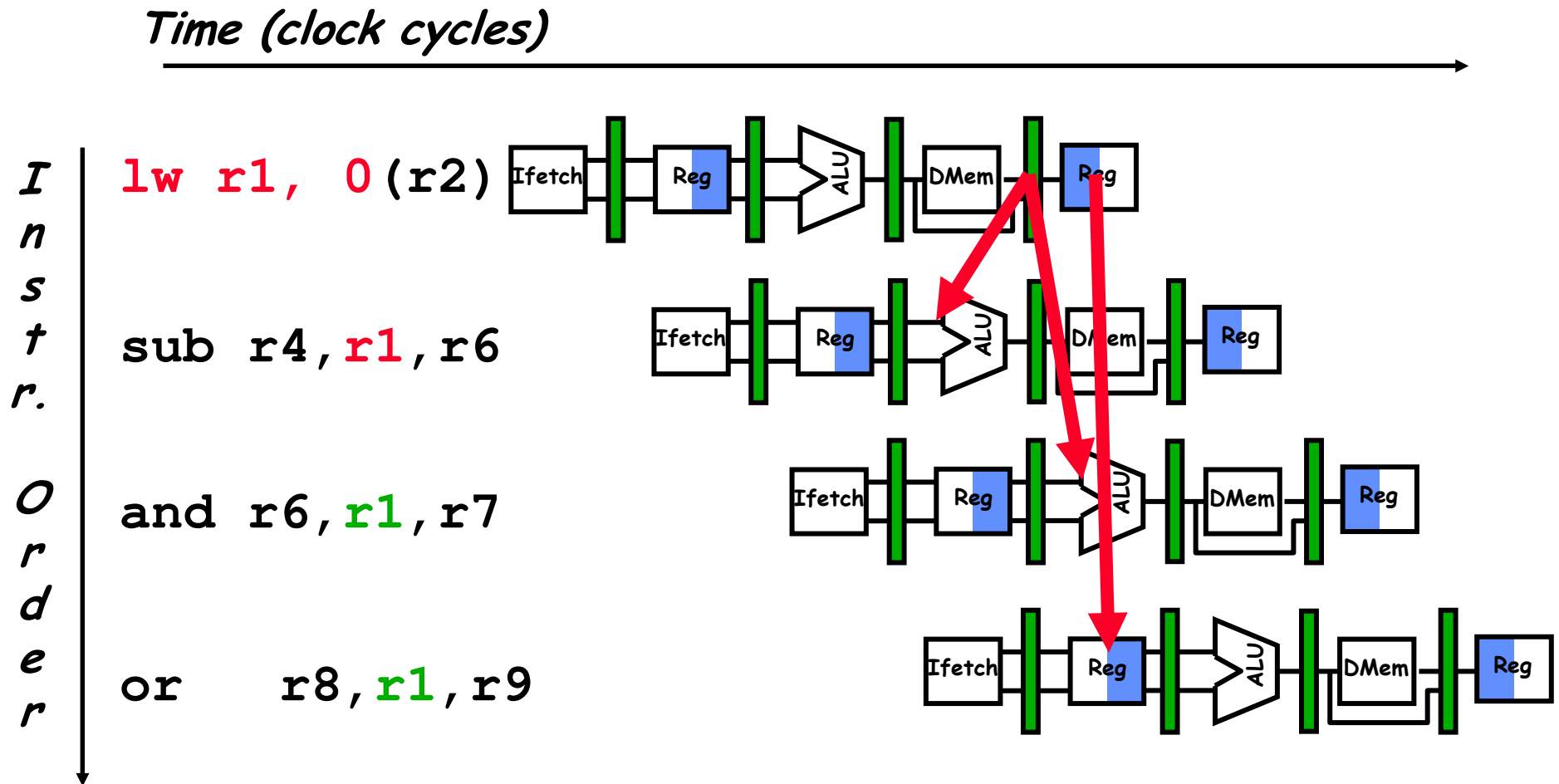
- Forward para o estágio Execute a partir de:
 - Memory stage ou
 - Writeback stage
- Lógica de Forwarding para *ForwardAE*:

```
if      ((rsE != 0) AND (rsE == WriteRegM) AND RegWriteM) then
        ForwardAE = 10
else if ((rsE != 0) AND (rsE == WriteRegW) AND RegWriteW) then
        ForwardAE = 01
else
        ForwardAE = 00
```

- Lógica de Forwarding para *ForwardBE* similar, trocando *rsE* com *rtE*, e *ForwardAE* com *ForwardBE*

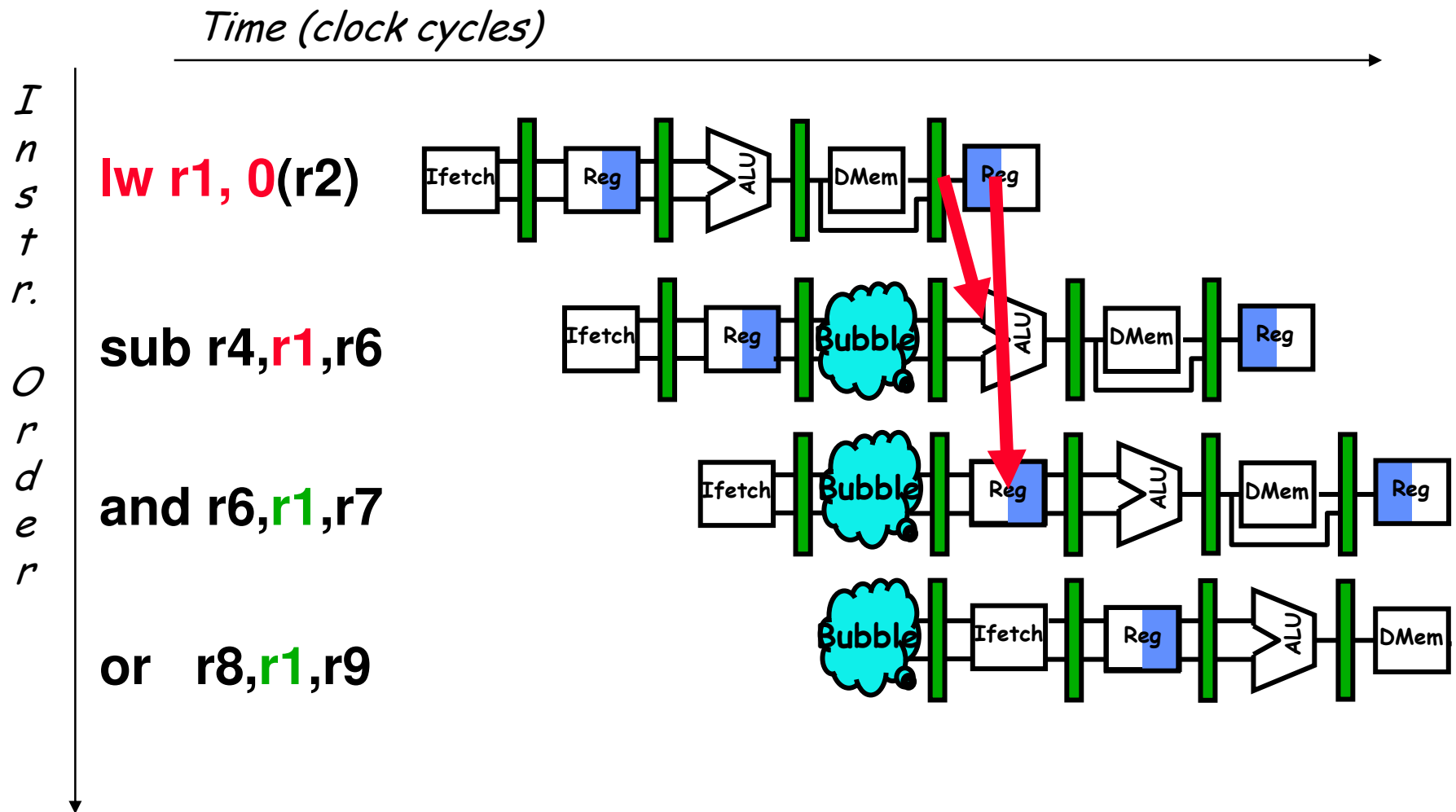
Processador MIPS Pipelined

- Data Hazard com Forwarding



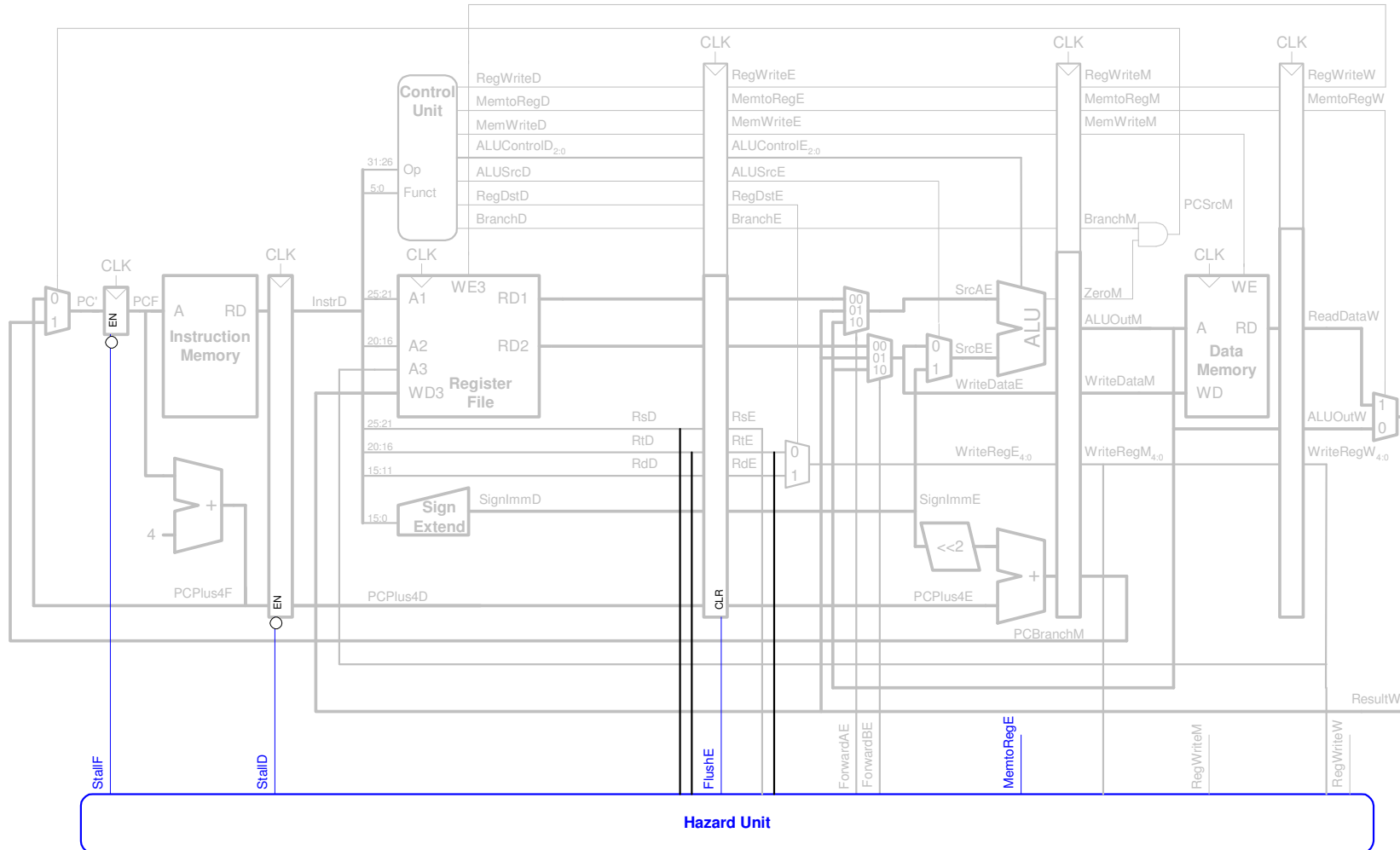
Processador MIPS Pipelined

- Data Hazard com Forwarding



Processador MIPS Pipelined

- Hardware para Stall



Processador MIPS Pipelined

- Lógica para Stall:

$$lwstall = ((rsD == rtE) \text{ OR } (rtD == rtE)) \text{ AND } MemtoRegE$$

$$StallF = StallD = FlushE = lwstall$$

Processador MIPS Pipelined

- Load Hazards - Software Scheduling

Código para (a, b, c, d, e, f na memória).

a = b + c;

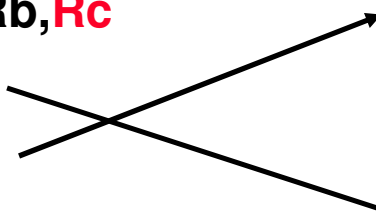
d = e - f;

Slow_code:

LW	Rb,b
LW	Rc,c
ADD	Ra,Rb, Rc
SW	a,Ra
LW	Re,e
LW	Rf,f
SUB	Rd,Re, Rf
SW	d,Rd

Fast_code:

LW	Rb,b
LW	Rc,c
LW	Re,e
ADD	Ra,Rb,Rc
LW	Rf,f
SW	a,Ra
SUB	Rd,Re,Rf
SW	d,Rd

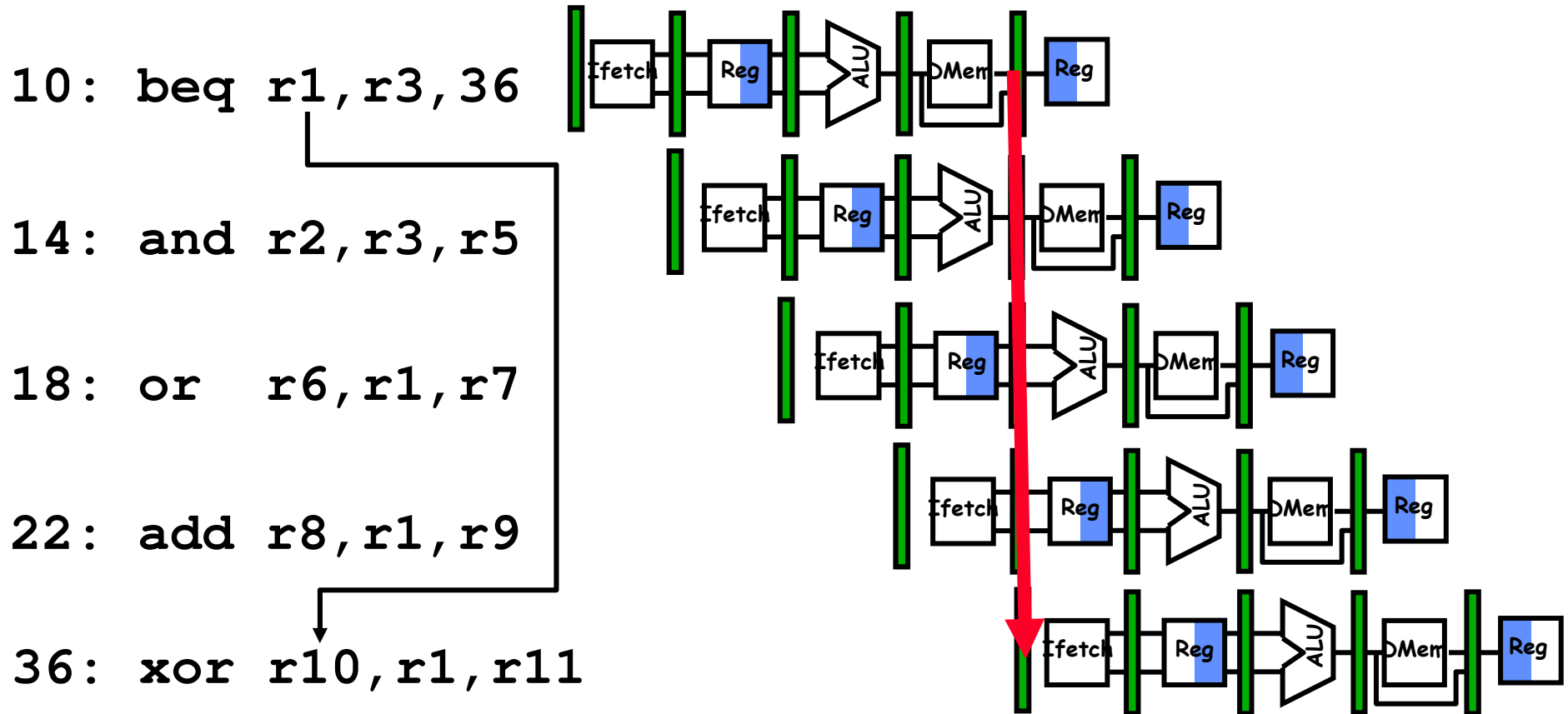


Processador MIPS Pipelined

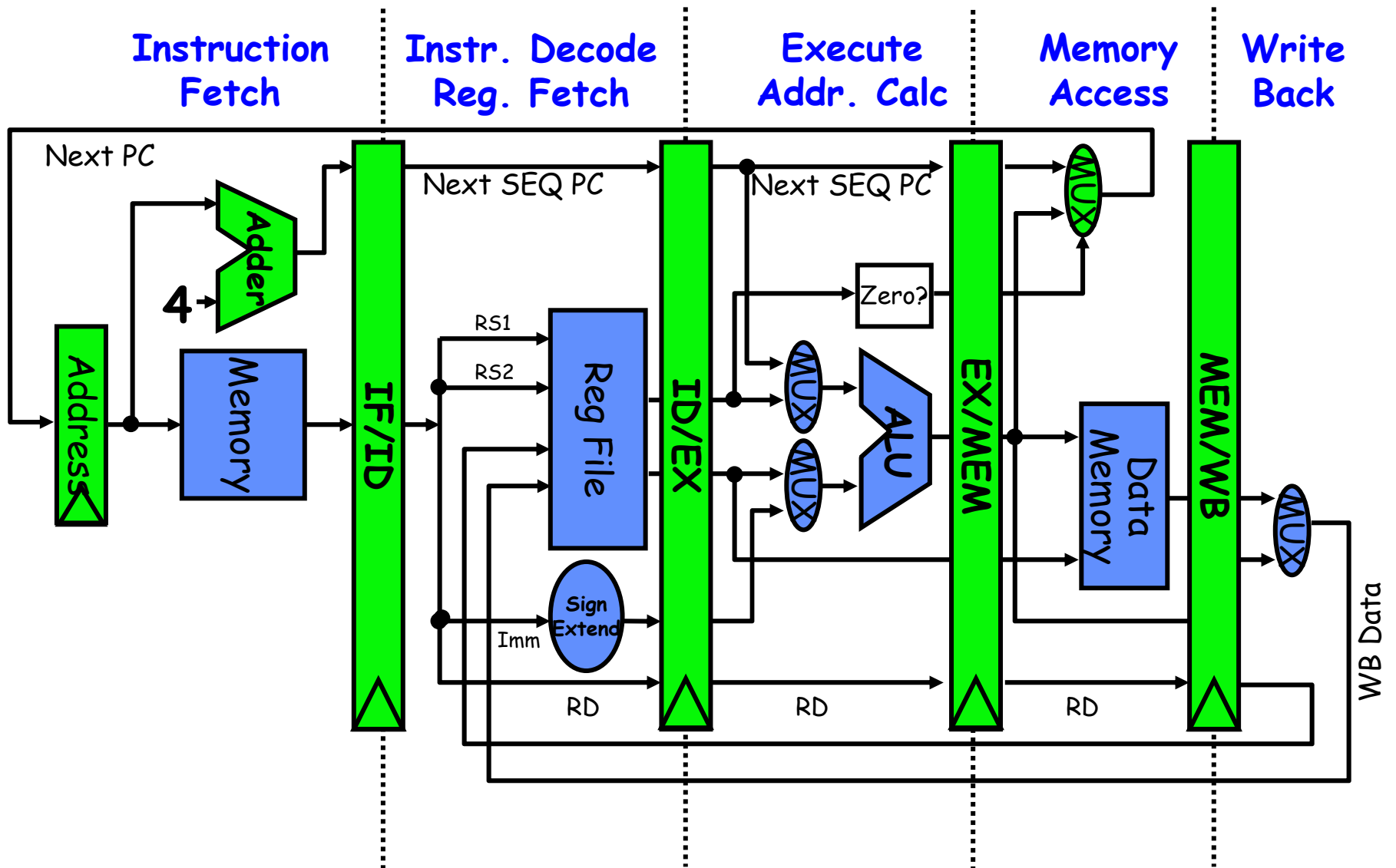
Control Hazard

- beq: o branch não é determinado até o 4 estágio do pipeline
- Definições:
 - **Branch delay slot(s)**: Instruções buscadas antes do branch ser determinado
 - **Misprediction penalty**: número de instruções *flushed* quando o branch é *taken*
- Várias estratégias são usadas para lidar com control hazards:
 - Stall o pipeline
 - Rearranjar o código e por instruções "úteis" no(s) branch delay slot(s)
 - **Reduzir o misprediction penalty (determinar o branch mais cedo no pipeline)**
 - Flush pipeline quando o branch é taken

Processador MIPS Pipelined



Processador MIPS Pipelined



Processador MIPS Pipelined

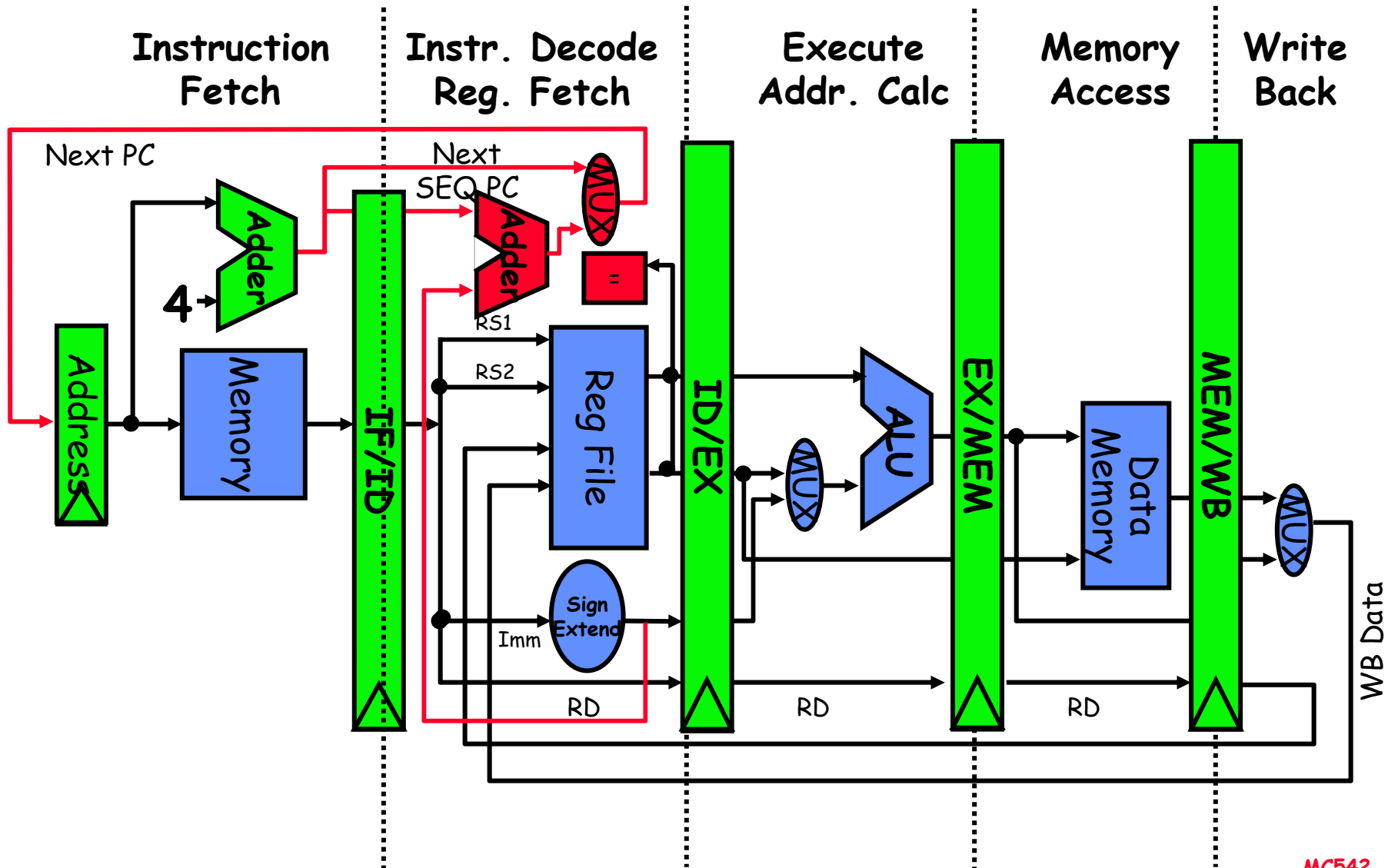
Exemplo: Impacto do Branch Stall no Desempenho

- Se $CPI = 1$, 30% branches, 3-cycle stall

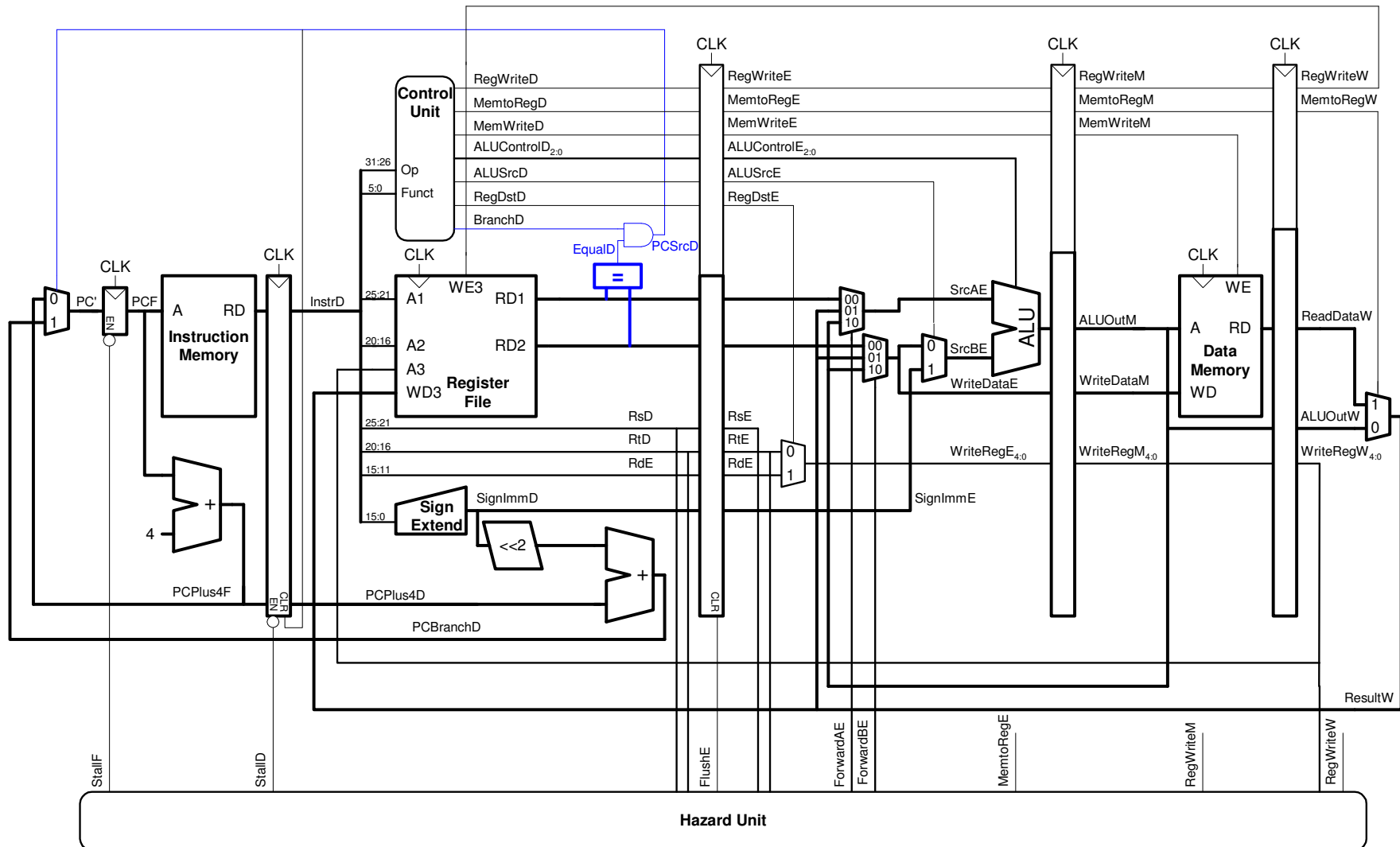
⇒ **$CPI = 1.9!$**

- Solução para minimizar os efeitos:
 - Determinar **branch taken ou não** o mais cedo, e
 - Calcular o endereço alvo do branch logo
- MIPS branch: testa se $regs =$ ou \neq
- Solução MIPS:
 - Zero test no estágio ID/RF
 - Adder para calcular o novo PC no estágio ID/RF
 - 1 clock cycle penalty por branch versus 3

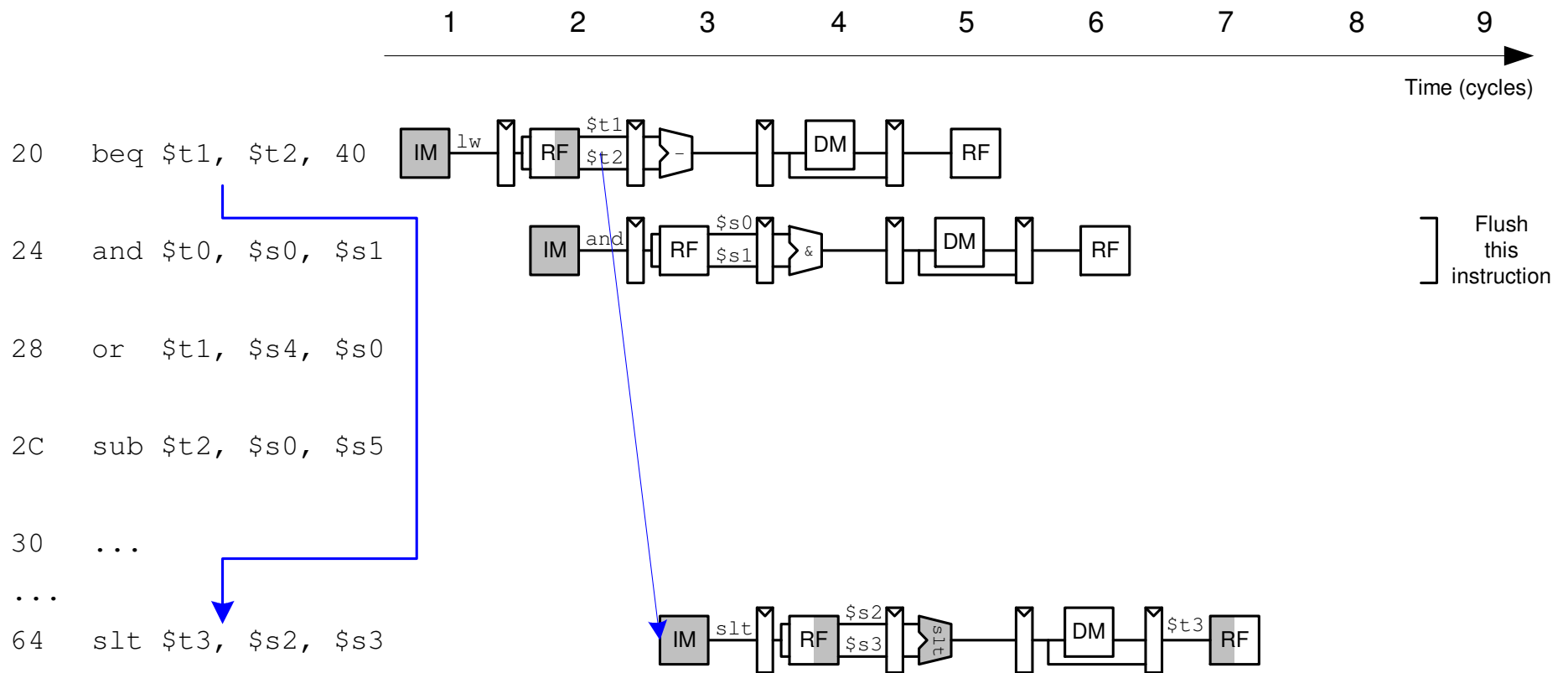
Processador MIPS Pipelined



Processador MIPS Pipelined



Processador MIPS Pipelined



Processador MIPS Pipelined

Alternativas para Branch Hazard

#1: Stall até a decisão se o branch será tomado ou não

#2: Predict Branch Not Taken

- Executar a próxima instrução
- “Invalidar” as instruções no pipeline se branch é tomado
- Vantagem: retarda a atualização do pipeline
- 47% dos branches no MIPS não são tomados, em média
- PC+4 já está computado, use-o para pegar a próxima instrução

#3: Predict Branch Taken

- 53% dos branches do MIPS são tomados, em média
- “branch target address” no MIPS ainda não foi calculado
 - » 1 cycle branch penalty
 - » Em outras máquinas esse penalty pode não ocorrer

Processador MIPS Pipelined

Alternativas para Branch Hazard

#4: Delayed Branch

- Define-se que o branch será tomado **APÓS** a uma dada quantidade de instruções

branch instruction

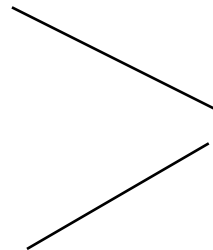
sequential successor₁

sequential successor₂

.....

sequential successor_n

branch target if taken



Branch delay de tamanho n
(*n delay slots*)

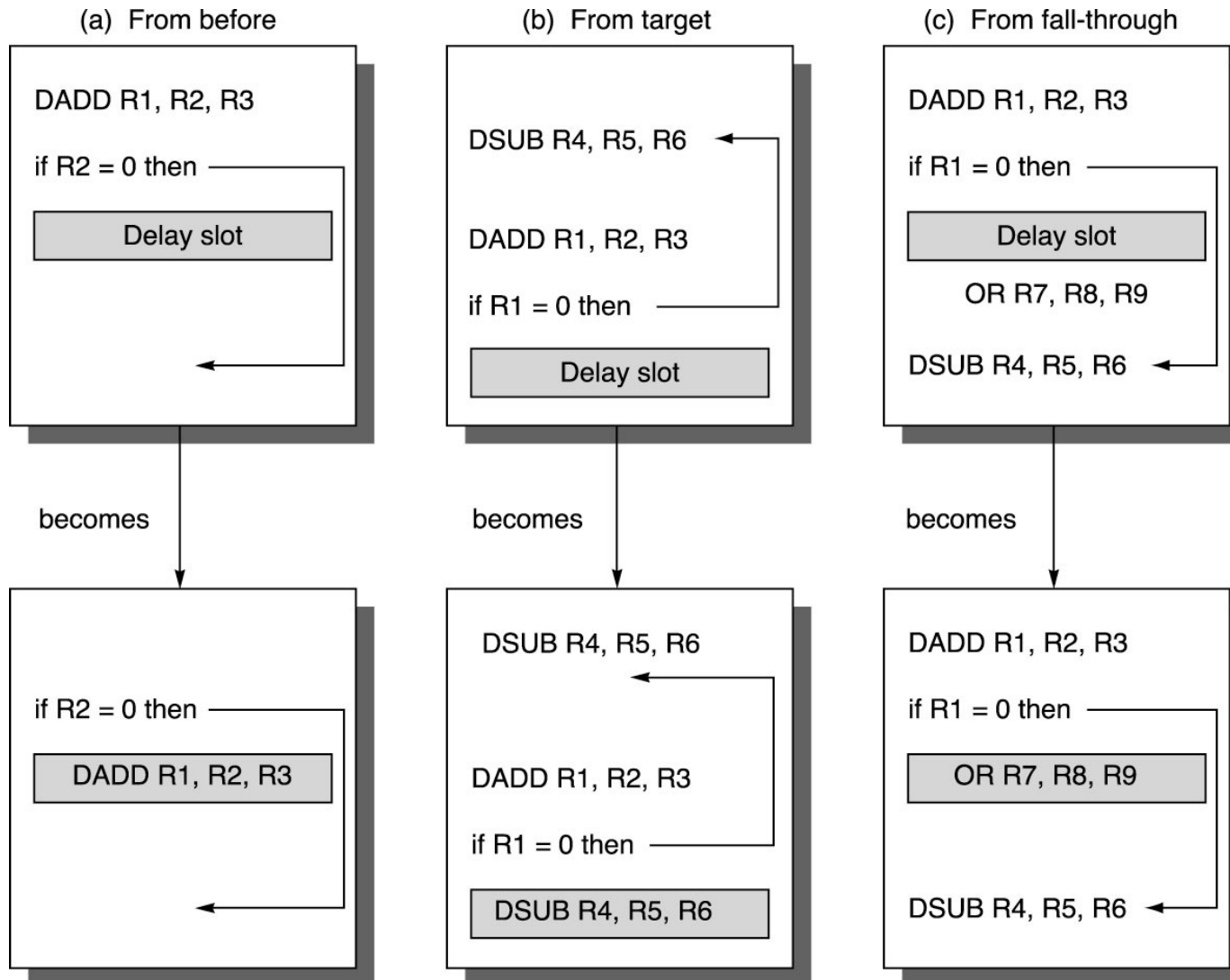
- 1 slot delay permite a decisão e o calculo do "branch target address" no pipeline de 5 estágios
- MIPS usa esta solução

Processador MIPS Pipelined

Delayed Branch

- Qual instrução usar para preencher o branch delay slot?
 - Antes do branch
 - Do target address (avaliada somente se branch taken)
 - Após ao branch (somente avaliada se branch not taken)

Processador MIPS Pipelined

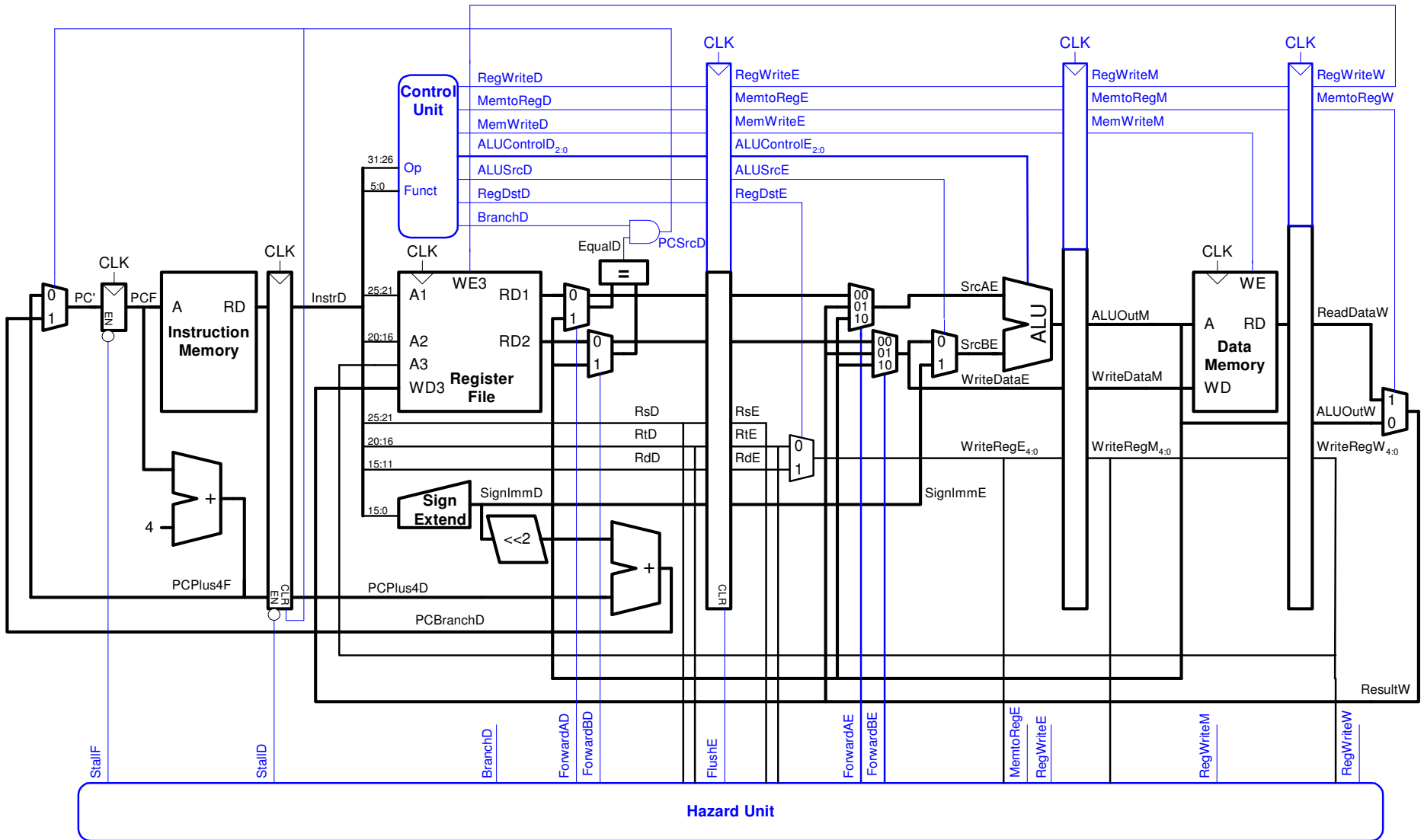


Processador MIPS Pipelined

- **Compilador: single branch delay slot:**
 - Preenche +/- 60% dos branch delay slots
 - +/- 80% das instruções executadas no branch delay slots são úteis à computação
 - +/- 50% ($60\% \times 80\%$) dos slots preenchidos são úteis

Processador MIPS Pipelined

Tratando data e control hazards



Processador MIPS Pipelined

Control Forwarding e Stalling Hardware

- Lógica de Forwarding:

$ForwardAD = (rsD \neq 0) \text{ AND } (rsD == WriteRegM) \text{ AND } RegWriteM$

$ForwardBD = (rtD \neq 0) \text{ AND } (rtD == WriteRegM) \text{ AND } RegWriteM$

- Lógica de Stalling:

$branchstall = BranchD \text{ AND } RegWriteE \text{ AND } (WriteRegE == rsD$
 $\text{OR } WriteRegE == rtD) \text{ OR}$

$BranchD \text{ AND } MemtoRegM \text{ AND } (WriteRegM == rsD$
 $\text{OR } WriteRegM == rtD)$

$StallF = StallD = FlushE = lwstall \text{ OR } branchstall$

Processador MIPS Pipelined

Desempenho do MIPS Pipelined

Ideal: $CPI = 1$, $IPC = 1$

Porém devido aos But stall (causados por loads e branches)

SPECINT2000 benchmark:

25% loads

10% stores

11% branches

2% jumps

52% R-type

Suponha que:

40% dos loads são usados pela próxima instrução

25% dos branches são mispredicted

Qual o médio CPI?

$$\text{Average CPI} = (0.25)(1.4) + (0.1)(1) + (0.11)(1.25) + (0.02)(2) + (0.52)(1) = 1.15$$

Processador MIPS Pipelined

Desempenho do MIPS Pipelined

- Pipelined processor critical path:

$$T_c = \max \left\{ \begin{array}{l} t_{pcq} + t_{mem} + t_{setup} \\ 2(t_{RFread} + t_{mux} + t_{eq} + t_{AND} + t_{mux} + t_{setup}) \\ t_{pcq} + t_{mux} + t_{mux} + t_{ALU} + t_{setup} \\ t_{pcq} + t_{memwrite} + t_{setup} \\ 2(t_{pcq} + t_{mux} + t_{RFwrite}) \end{array} \right\}$$

Processador MIPS Pipelined

Exemplo de Desempenho

Element	Parameter	Delay (ps)
Register clock-to-Q	t_{pcq_PC}	30
Register setup	t_{setup}	20
Multiplexer	t_{mux}	25
ALU	t_{ALU}	200
Memory read	t_{mem}	250
Register file read	t_{RFread}	150
Register file setup	$t_{RFsetup}$	20
Equality comparator	t_{eq}	40
AND gate	t_{AND}	15
Memory write	$T_{memwrite}$	220
Register file write	$t_{RFwrite}$	100 ps

$$\begin{aligned} T_c &= 2(t_{RFread} + t_{mux} + t_{eq} + t_{AND} + t_{mux} + t_{setup}) \\ &= 2[150 + 25 + 40 + 15 + 25 + 20] \text{ ps} = 550 \text{ ps} \end{aligned}$$

Processador MIPS Pipelined

Exemplo de Desempenho

- Para um programa que executa 100 bilhões de instruções em um processador MIPS pipelined,
- $CPI = 1.15$
- $T_c = 550 \text{ ps}$

$$\begin{aligned}\text{Execution Time} &= (\# \text{ instructions}) \times CPI \times T_c \\ &= (100 \times 10^9)(1.15)(550 \times 10^{-12}) \\ &= 63 \text{ seconds}\end{aligned}$$

Processador MIPS Pipelined

Exemplo de Desempenho

Processor	Execution Time (seconds)	Speedup (single-cycle is baseline)
Single-cycle	95	1
Multicycle	133	0.71
Pipelined	63	1.51