



Aula 16

Implementação RISC-V

Pipeline - Conceitos



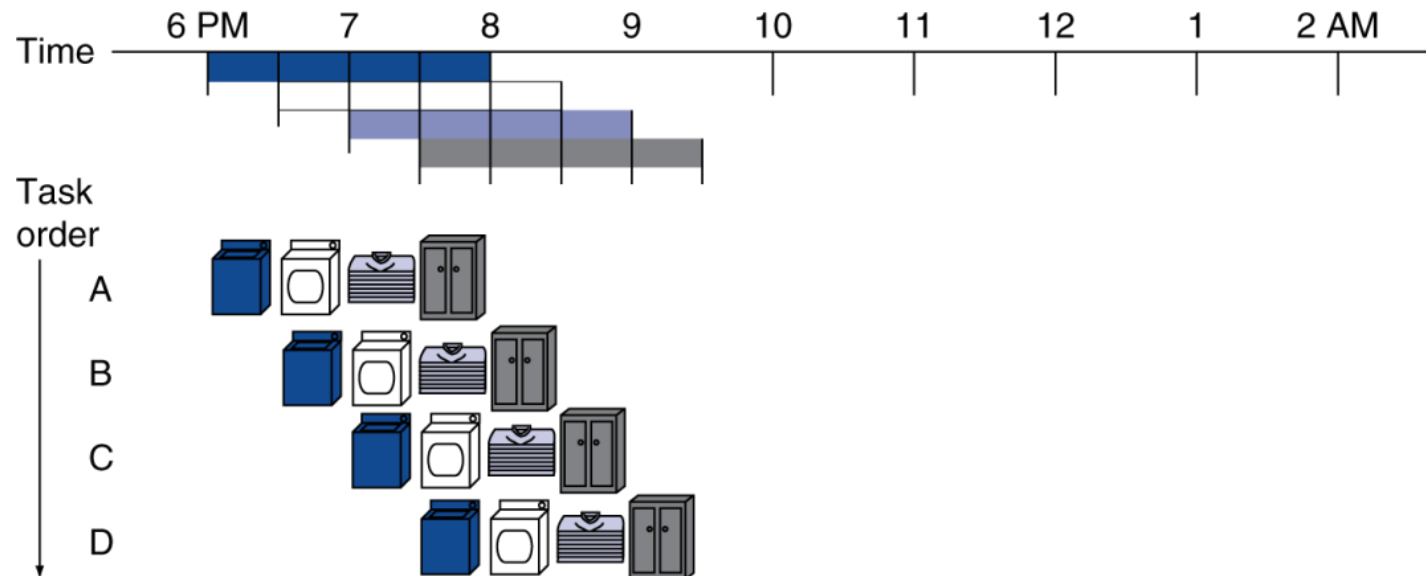
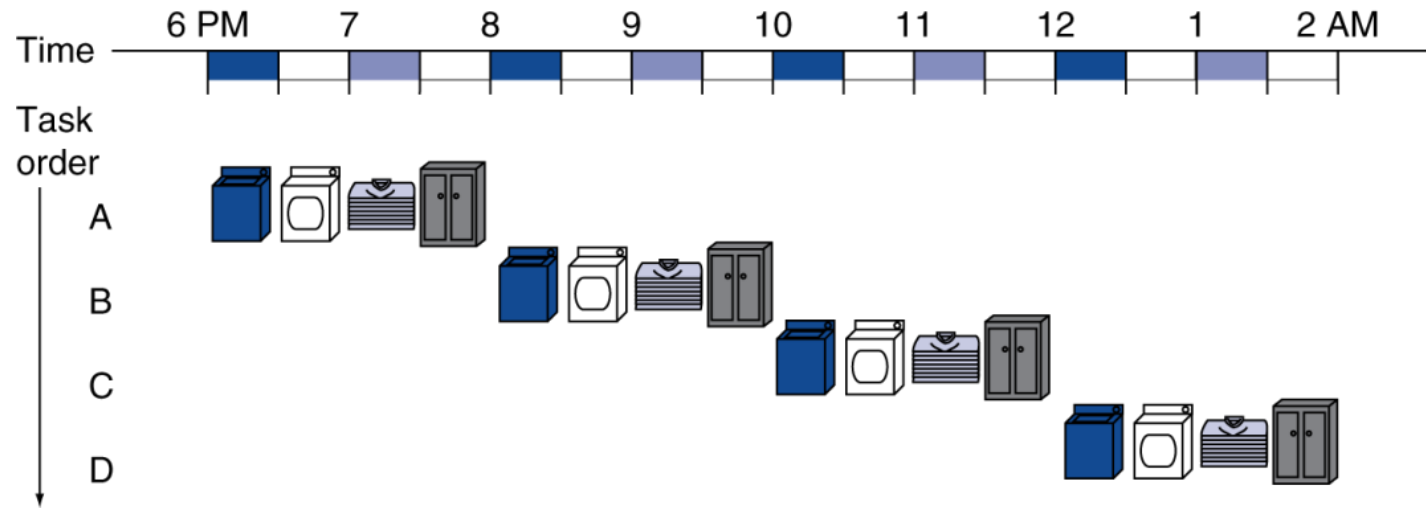


Objetivo

- Apresentar técnicas para aumento de desempenho de uma única tarefa em único processador usando ILP (*Instruction Level Parallelism*):
 - **Pipelining** : Técnica de projeto onde o *hardware* processa mais de uma instrução de cada vez, sem esperar que uma instrução termine antes de começar a próxima.
 - **Superpipeline** : Técnicas para aumento da eficiência do pipeline.
 - **Superscalar**: Uso eficiente de múltiplas unidades funcionais.
- Outros níveis de paralelismo: Aumenta a eficiência em máquinas multitask.
 - Multithread : Várias tarefas independentes simultaneamente, aproveitando-se das “falhas” do pipeline e/ou de estrutura superscalar. (Intel: Hyper Thread – cores lógicos)
 - Multicore: Vários núcleos(cores físicos) em 1 chip, compartilhando memórias caches.
 - Multiprocessor: Sistema multiprocessado/distribuído. Diferentes computadores.

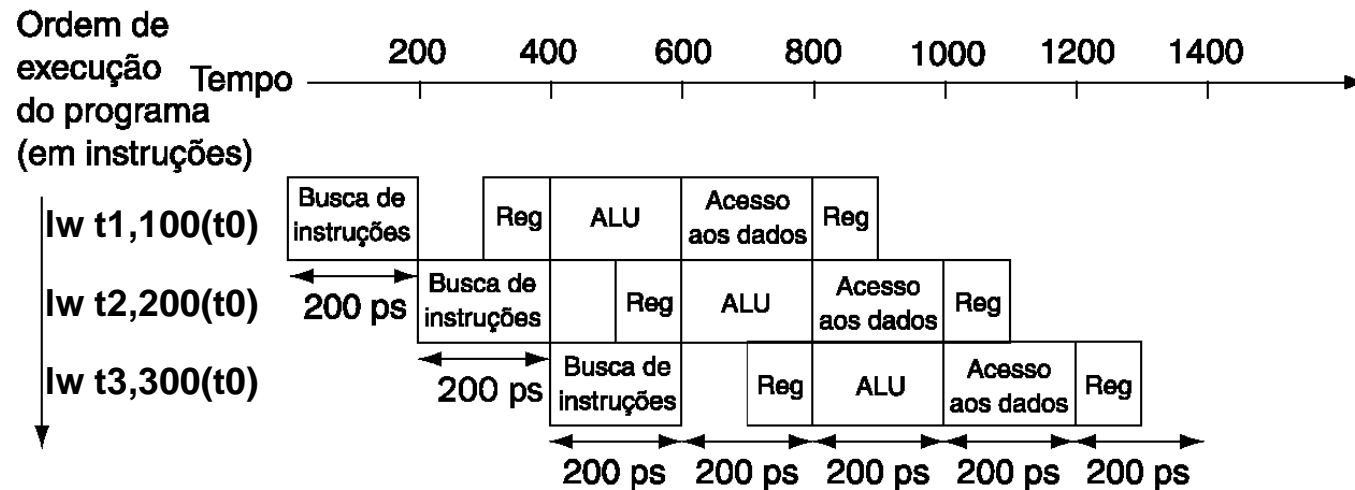
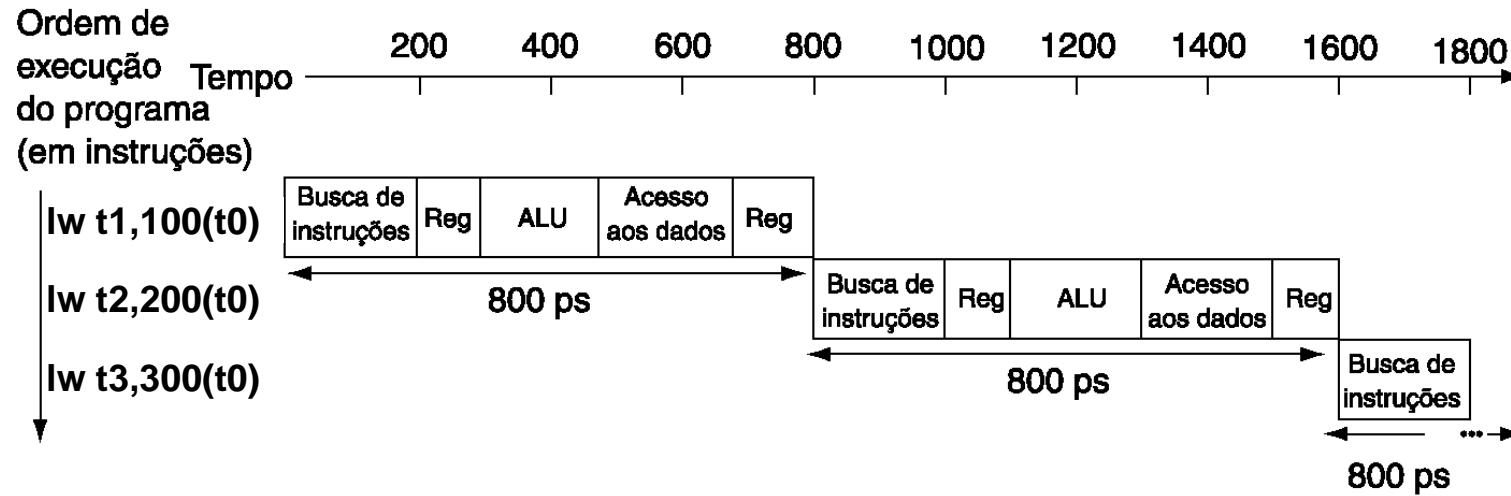


Pipelining: Conceito Básico





Uniciclo vs Pipeline





Análise

- Latência: 5 ciclos. Vazão: 1 instrução/ciclo
- Qual a aceleração ideal?
 - Para estágios balanceados, condições ideais e grande número de instruções:

$$\textit{Tempo entre Instruções}_{com\ pipeline} = \frac{\textit{Tempo_entre_Instruções}_{sem\ pipeline}}{\textit{Número de estágios do pipeline}}$$

- Porque estágios balanceados? (sem lacunas)
- Por que condições ideais? (sem hazards)
- Porque grande número de instruções? (desconsiderando o efeito da latência)

Ex.: 3 instruções: 2400 vs 1400

1.000.000 instruções: 1.000.000x800 vs 999.999x200+1000



Pipeline

O que facilita o pipeline:

- ***Todas instruções têm o mesmo comprimento.***

Obs.: x86 possui instruções de 1 a 17 bytes, dificulta o cálculo do endereço da próxima instrução e a leitura da própria instrução da memória.

- ***Poucos formatos de instruções.***

Obs.: Os operandos (rs1,rs2,rd) estão sempre nas mesmas posições

- ***Operandos em memória só aparecem em loads e stores.***

Obs.: Pode-se usar a ULA para cálculo de endereço.

O mesmo não vale para busca de operandos da ULA da memória (x86-64)

O que complica (hazards):

- ***Riscos Estruturais***
- ***Riscos de Dados***
- ***Riscos de Controle***



Hazard Estruturais

- Hardware pode não admitir a combinação de instruções em um mesmo ciclo de clock.
 - Ou a unidade funcional está ocupada no momento.
- 1) O que aconteceria se só houvesse 1 pessoa na lavanderia?
 - 2) Considerando apenas 1 memória para dados e instruções, como ficaria uma quarta instrução no exemplo dado?



Hazard de Dados

- Pipeline precisa ser interrompido por que uma etapa precisa esperar até que outra seja concluída.
- 1) O que fazer se 1 pé de meia seu foi lavado junto com as roupas de seu colega? (indivíduo com TOC)
- 2) Exemplo:
add s0, t0, t1
sub t2, s0, t3

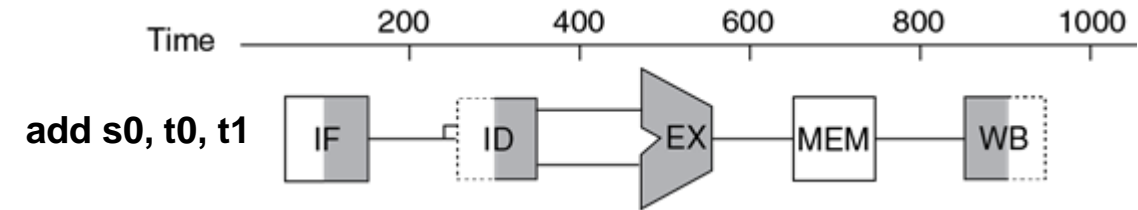
Soluções:

- Inserção de Bolhas
- Execução fora de ordem (compilador e processador)
- Adiantamento, Forwarding ou Bypassing



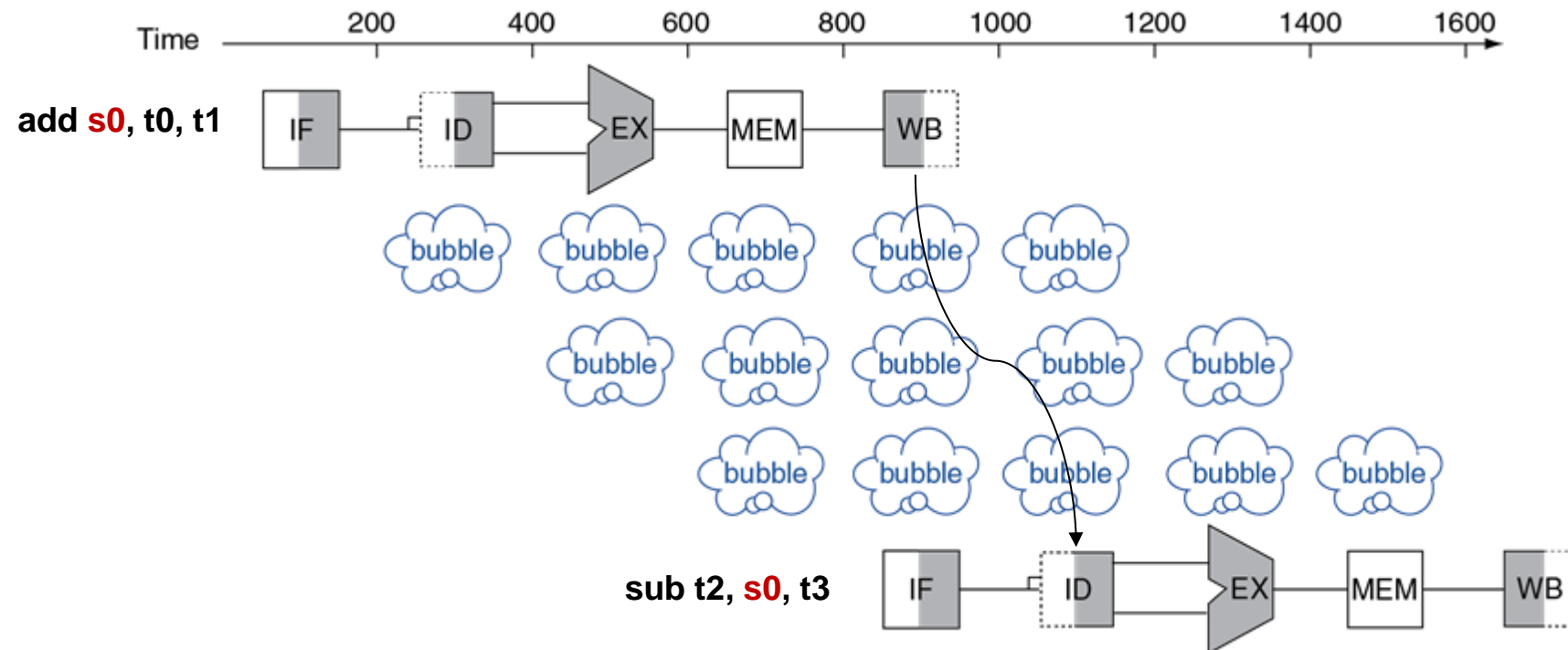
Inserção de Bolhas

■ Representação gráfica



■ Bolhas

□ Sabendo que o registrador s0 é escrito no 5º estágio





Inserção de Bolhas

■ Representação tradicional

| Ciclo | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|--------------|----|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| add s0,t0,t1 | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | |
| sub t2,s0,t3 | | IF | ID* | ID* | ID* | ID | EX | ME | WB | | | | |
| or s2,s3,s4 | | | IF* | IF* | IF* | IF | ID | EX | ME | WB | | | |
| slt t0,t1,t3 | | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | |

Aqui é identificado o hazard → 3 ciclos de **stall**

Parada do pipeline
Injeta bolha



Execução Fora de Ordem

- Aproveitar os espaços das bolhas para tarefas úteis que sejam independentes.
- Alterar o algoritmo sem alterar o resultado!

□ Ex.:

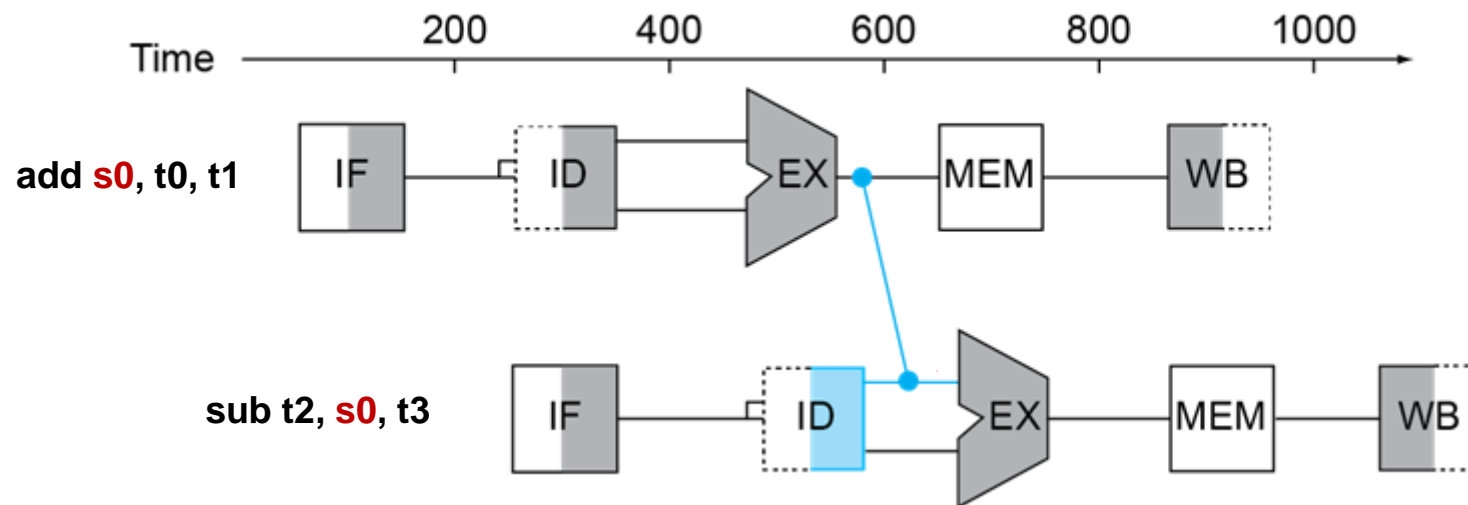
```
ori t6, t6, 100  
add s1, zero, zero  
addi t5, t4, 256  
add s0, t0, t1  
sub t2, s0, t3
```



```
add s0, t0, t1  
ori t6, t6, 100  
add s1, zero, zero  
addi t5, t4, 256  
sub t2, s0, t3
```

Forwarding

- Observação: não é necessário esperar que a instrução termine antes de tentar resolver o hazard de dados.

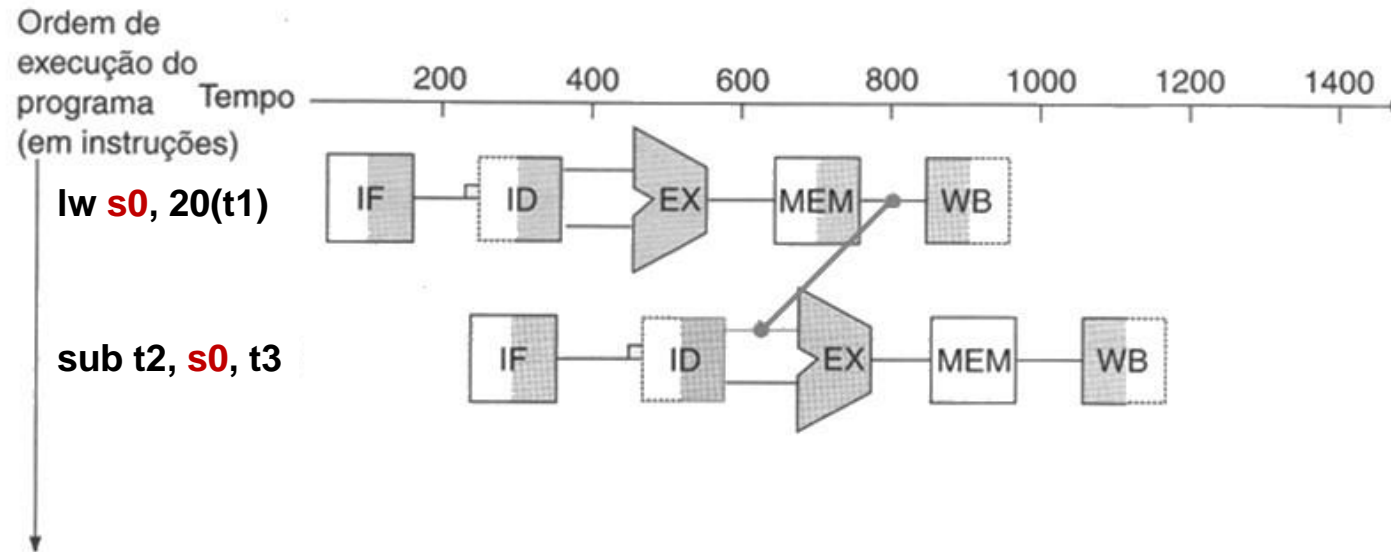


| Ciclo | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-----------------------|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| add s0 ,t0,t1 | IF | ID | EX | MEM | WB | | | | | | | | |
| sub t2, s0 ,t3 | | IF | ID | EX | MEM | WB | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |



Forwarding

- E se fosse um load?



Em 600ps se necessita de um dado que estará disponível somente aos 800ps

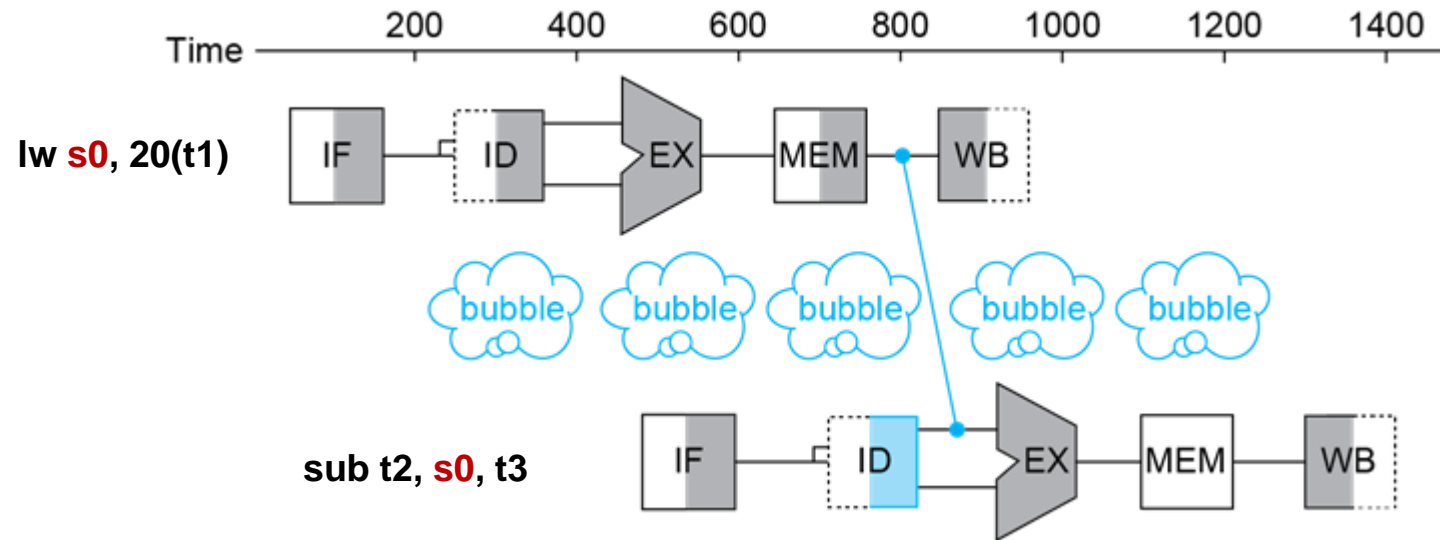
Sistema que prevê o futuro!

**Sistema
Não Causal**



Forwarding

- Solução: Inserir uma bolha (**stall**) e dar forwarding



| Ciclo | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-----------------------|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| lw s0 ,20(t1) | IF | ID | EX | MEM | WB | | | | | | | | |
| sub t2, s0 ,t3 | | IF | ID | ID* | EX | MEM | WB | | | | | | |
| add s3,s2,s1 | | | IF | IF* | ID | EX | MEM | WB | | | | | |
| or t0,t1,t3 | | | | | IF | ID | EX | MEM | WB | | | | |



■ Exemplo:

| | |
|--------|--------------|
| A=B+E; | lw t1,0(fp) |
| | lw t2,4(fp) |
| C=B+F; | add t3,t1,t2 |
| | sw t3,12(fp) |
| | lw t4,8(fp) |
| | add t5,t1,t4 |
| | sw t5,16(fp) |

Identifique os hazards.

Como solucionar utilizando apenas bolhas?

Quantos ciclos são necessários com latência?

Como solucionar de maneira mais eficiente?

Quantos ciclos são necessários sem latência?



Ideal

Identificando os hazards

| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| lw t1 ,0(fp) | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | |
| lw t2 ,4(fp) | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | |
| add t3 , t1 , t2 | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | |
| sw t3 ,12(fp) | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | |
| lw t4 ,8(fp) | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | |
| add t5 ,t1, t4 | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | |
| sw t5 ,16(fp) | | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB |



| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| lw t1,0(fp) | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| lw t2,4(fp) | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| nop | | | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | |
| nop | | | | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | |
| nop | | | | | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | |
| add t3,t1,t2 | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | | | | | | |
| nop | | | | | | | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | |
| nop | | | | | | | | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | |
| nop | | | | | | | | | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | |
| sw t3,12(fp) | | | | | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | | |
| lw t4,8(fp) | | | | | | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | |
| nop | | | | | | | | | | | | * | * | * | * | * | | | | | | | |
| nop | | | | | | | | | | | | | * | * | * | * | * | | | | | | |
| nop | | | | | | | | | | | | | | * | * | * | * | * | | | | | |
| add t5,t1,t4 | | | | | | | | | | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | |
| nop | | | | | | | | | | | | | | | | * | * | * | * | * | | | |
| nop | | | | | | | | | | | | | | | | | * | * | * | * | * | * | |
| nop | | | | | | | | | | | | | | | | | | * | * | * | * | * | * |
| sw t5,16(fp) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB |



Na realidade o que ocorre:

| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|--------------|----|----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| lw t1,0(fp) | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| lw t2,4(fp) | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| add t3,t1,t2 | | | IF | ID* | ID* | ID* | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | | | | | | |
| sw t3,12(fp) | | | | IF* | IF* | IF* | IF | ID* | ID* | ID* | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | | |
| lw t4,8(fp) | | | | | | | | IF* | IF* | IF* | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | |
| add t5,t1,t4 | | | | | | | | | | | | IF | ID* | ID* | ID* | ID | EX | ME | WB | | | | |
| sw t5,16(fp) | | | | | | | | | | | | | IF* | IF* | IF* | IF | ID* | ID* | ID* | ID | EX | ME | WB |

Operação com forwarding

| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| lw t1,0(fp) | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | |
| lw t2,4(fp) | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | |
| nop | | | * | * | * | * | * | | | | | | |
| add t3,t1,t2 | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | |
| sw t3,12(fp) | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | |
| lw t4,8(fp) | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | |
| nop | | | | | | | * | * | * | * | * | | |
| add t5,t1,t4 | | | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | |
| sw t5,16(fp) | | | | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB |

| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|--------------|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|
| lw t1,0(fp) | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | | |
| lw t2,4(fp) | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | | |
| add t3,t1,t2 | | | IF | ID* | ID | EX | ME | WB | | | | | |
| sw t3,12(fp) | | | | IF* | IF | ID | EX | ME | WB | | | | |
| lw t4,8(fp) | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | |
| add t5,t1,t4 | | | | | | | IF | ID* | ID | EX | ME | WB | |
| sw t5,16(fp) | | | | | | | | IF* | IF | ID | EX | ME | WB |



Operação com forwarding e reordenamento

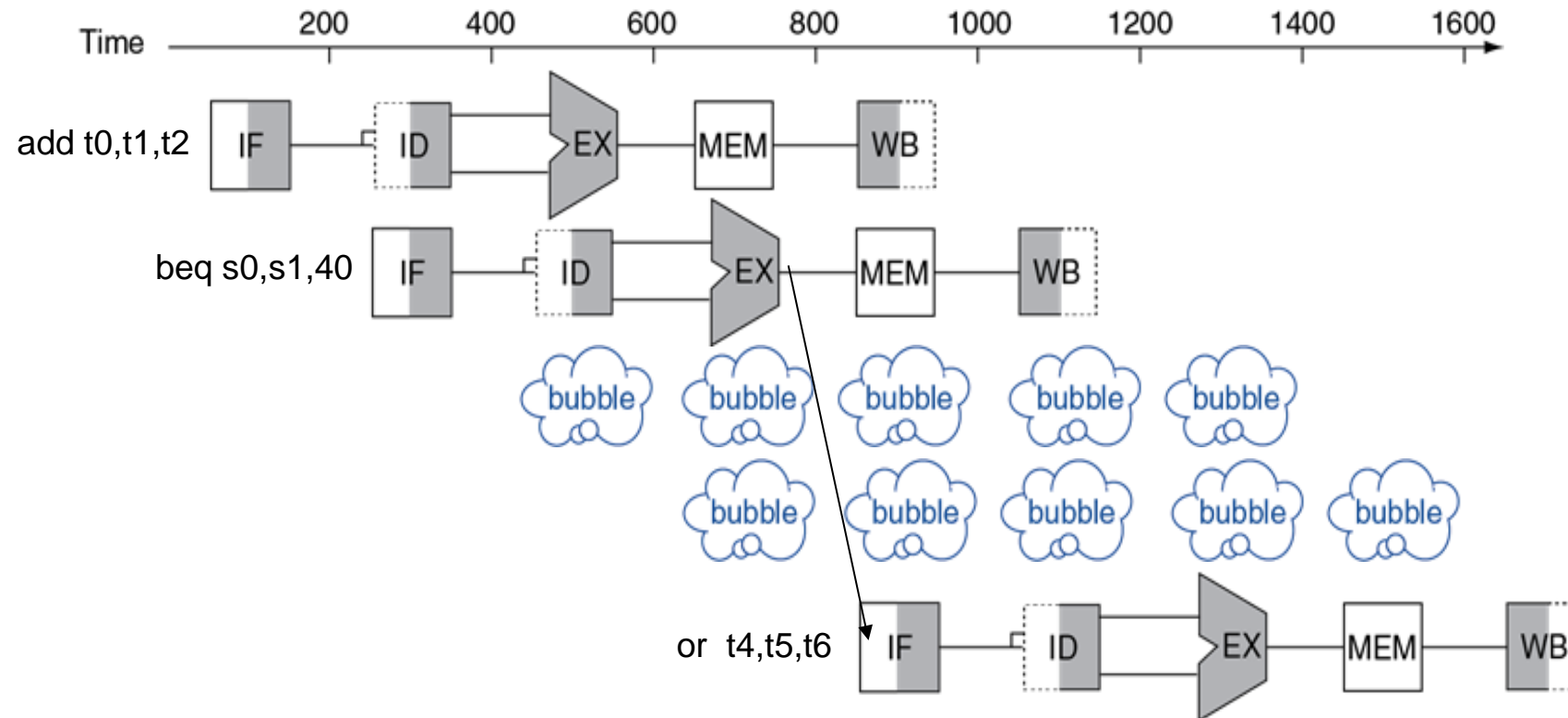
| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| lw t1,0(fp) | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | | |
| lw t2,4(fp) | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | | |
| lw t4,8(fp) | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | | |
| add t3,t1,t2 | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | | |
| sw t3,12(fp) | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | | |
| add t5,t1,t4 | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB | |
| sw t5,16(fp) | | | | | | | IF | ID | EX | ME | WB |

Diagram illustrating the execution of instructions with forwarding and reordering. The table shows the stages (IF, ID, EX, ME, WB) for each instruction over 11 clock cycles. Arrows indicate forwarding paths from the ME stage of earlier instructions to the EX stage of later instructions. A curved arrow on the left points to the instruction 'lw t4,8(fp)'.



Hazard de Controle

- Necessidade de tomar uma decisão com base nos resultados de uma instrução enquanto outras estão sendo executadas.



BEQ é avaliado pela ULA no 3º estágio => Necessita 2 bolhas!!!



Hazard de Controle

- Na realidade:

Aqui o beq é avaliado

| End. | Ciclo | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|------|---------------|----|----|----|-----|-----|----|----|-----|----|----|----|
| 36 | add t0,t1,t2 | IF | ID | EX | MEM | WB | | | | | | |
| 40 | beq s0,s1,16 | | IF | ID | EX | MEM | WB | | | | | |
| 44 | and s4,s5,s6 | | | IF | ID | * | * | * | | | | |
| 48 | ori t3,t4,255 | | | | IF | * | * | * | * | | | |
| ... | | | | | | | | | | | | |
| 72 | or t5,t6,t7 | | | | | IF | ID | EX | MEM | WB | | |

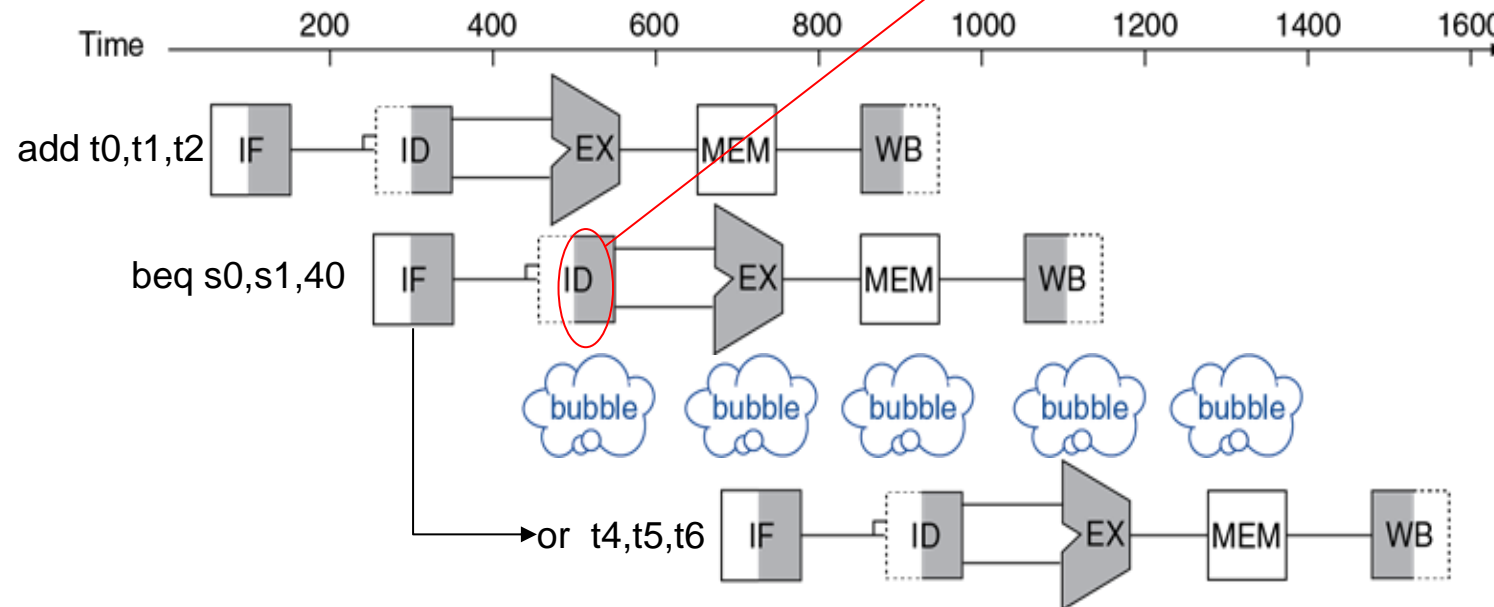
BEQ é avaliado pela ULA no 3º estágio => Necessita 2 **Flushes** !!!

Tornar a instrução um nop



Hazard de Controle

- Alterando o caminho de dados para que o BEQ seja avaliado no 2º Estágio => Economiza 1 Bolha!!



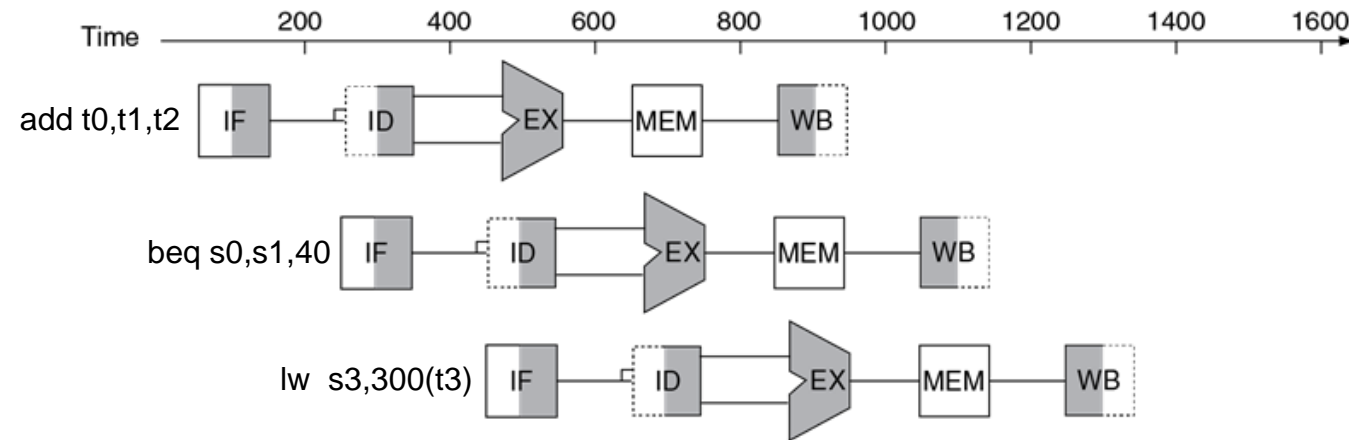
- Delayed Branch*: ocupar a bolha com uma instrução útil, equivalente a atrasar a execução do Branch
No exemplo: add t0,t1,t2 no lugar da bolha : NÃO USADO NO RISC-V!



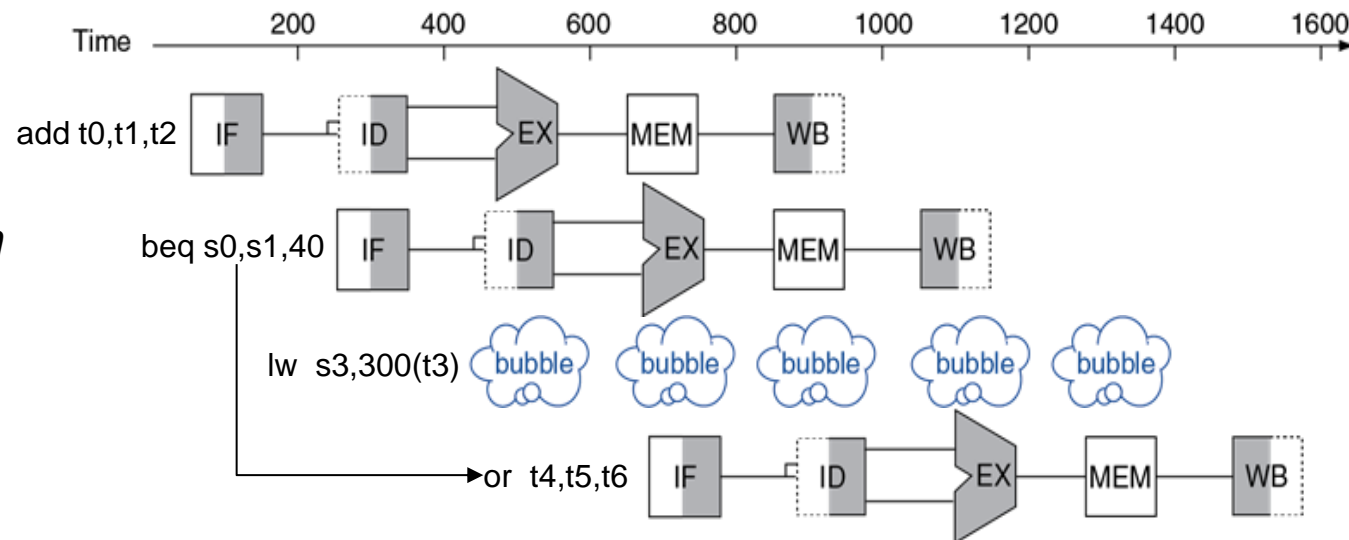
Hazard de Controle: Previsão de Desvios

- Prevendo estaticamente o desvio como não tomado

Caso de:
Desvio não tomado
Acerto!
“Vida que segue!”



Caso de:
Desvio tomado
Erro!
Necessita dar um *flush*
na instrução seguinte



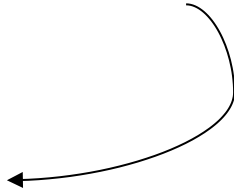


Hazard de Controle: Previsão de Desvios

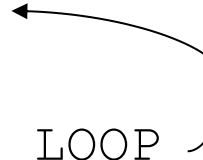
■ Prevendo Quase-Dinamicamente o desvio

Grande parte das vezes os desvios são usados em loops:

```
LOOP: beq t0,t1,FIM
      ...
      j  LOOP
FIM:  ...
```



```
LOOP: ...
      ...
      beq t0,t1, LOOP
FIM:  ...
```



No RISC-V o Label é calculado como $PC + Imm \ll 1$, assim

se $imm \geq 0$ $imm[31]=0$ endereço à frente \Rightarrow Prevê não tomar o desvio

se $imm < 0$ $imm[31]=1$ endereço para trás \Rightarrow Prevê tomar o desvio

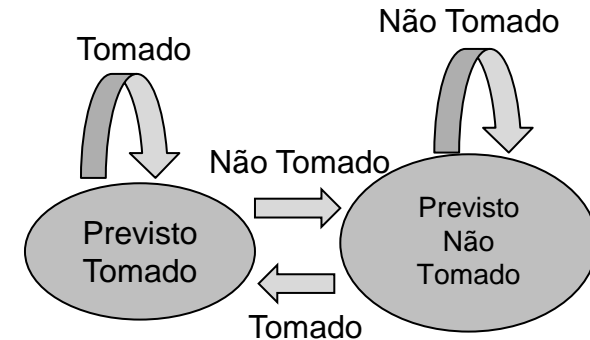


Hazard de Controle: Previsão de Desvios

■ Prevendo Dinamicamente o desvio

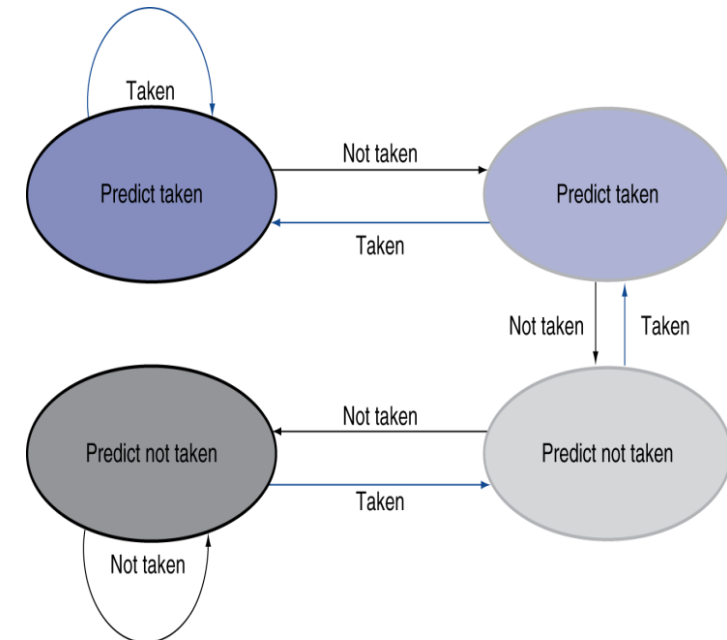
■ 1 Bit

- Considera que a previsão é a mesma da última escolha



■ 2 Bits

- Considera uma variação mais conservativa. MEF ao lado



■ Tabela de histórico

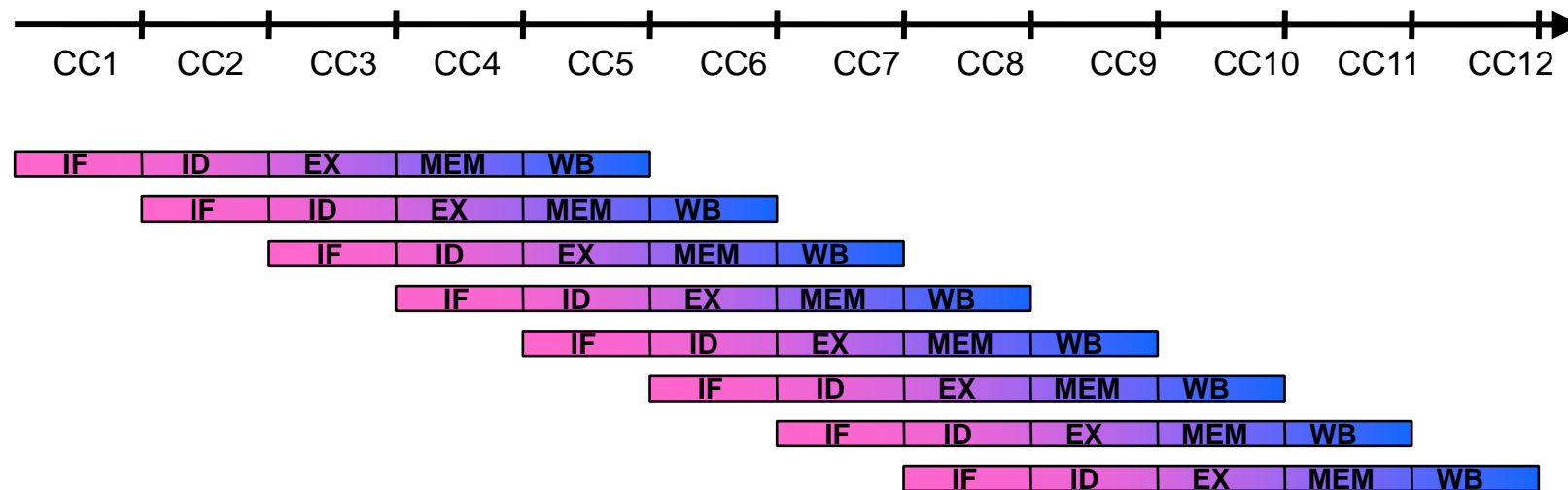
- Considera uma tabela com contador do histórico do número de vezes que o branch foi tomado e não tomado.

Mostrar Tool / BHT Simulator do Rars



Acelerando máquinas com *pipeline*

- A vazão máxima de uma máquina com *pipeline* é de uma instrução por ciclo de *clock*.



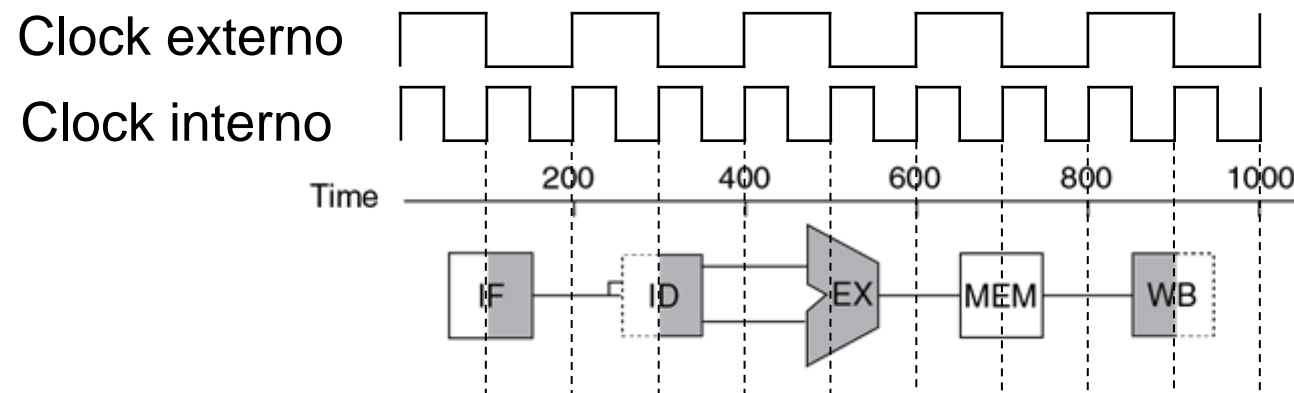
Técnicas para iniciar múltiplas instruções em 1 ciclo de clock:

- Estruturas *superpipeline*
- Estruturas *superescalares*.



Acelerando máquinas: *Superpipeline*

- A estrutura *Superpipeline* subdivide cada estágio do *pipeline* em sub-estágios, e multiplica internamente a frequência de *clock*.
- Pipeline mais profundo → maior aceleração.
- Cada sub-estágio continua executando uma instrução por *clock*. Mas como o *clock* interno é multiplicado, o *pipeline* pode aceitar duas ou mais instruções para cada *clock* externo.
- Porém: Maior frequência → Maior dissipação térmica



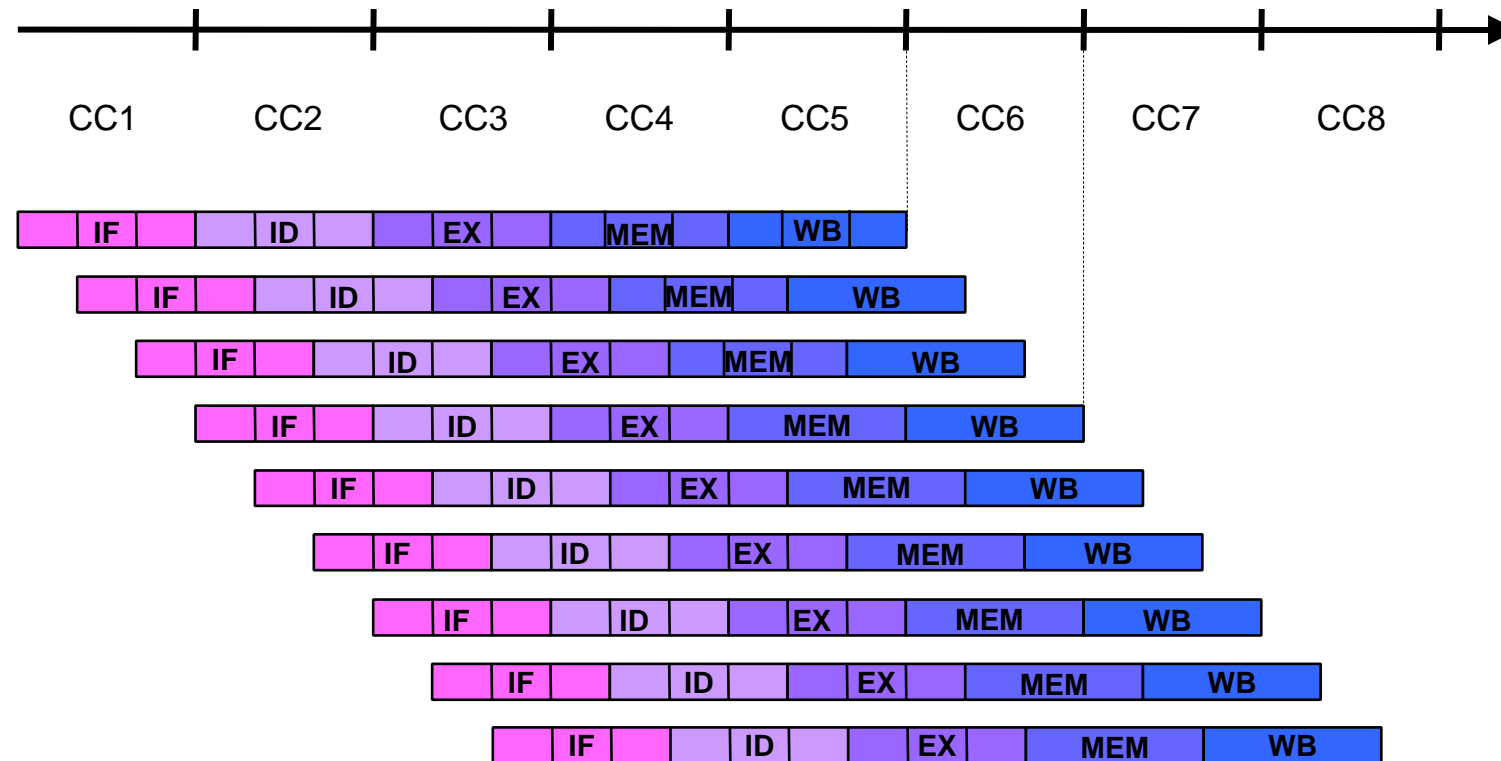


Superpipeline

Ex.: dividindo em 3 sub-estágios

CPI=?

Obs: Probabilidade de hazards aumenta → desempenho não é o esperado!

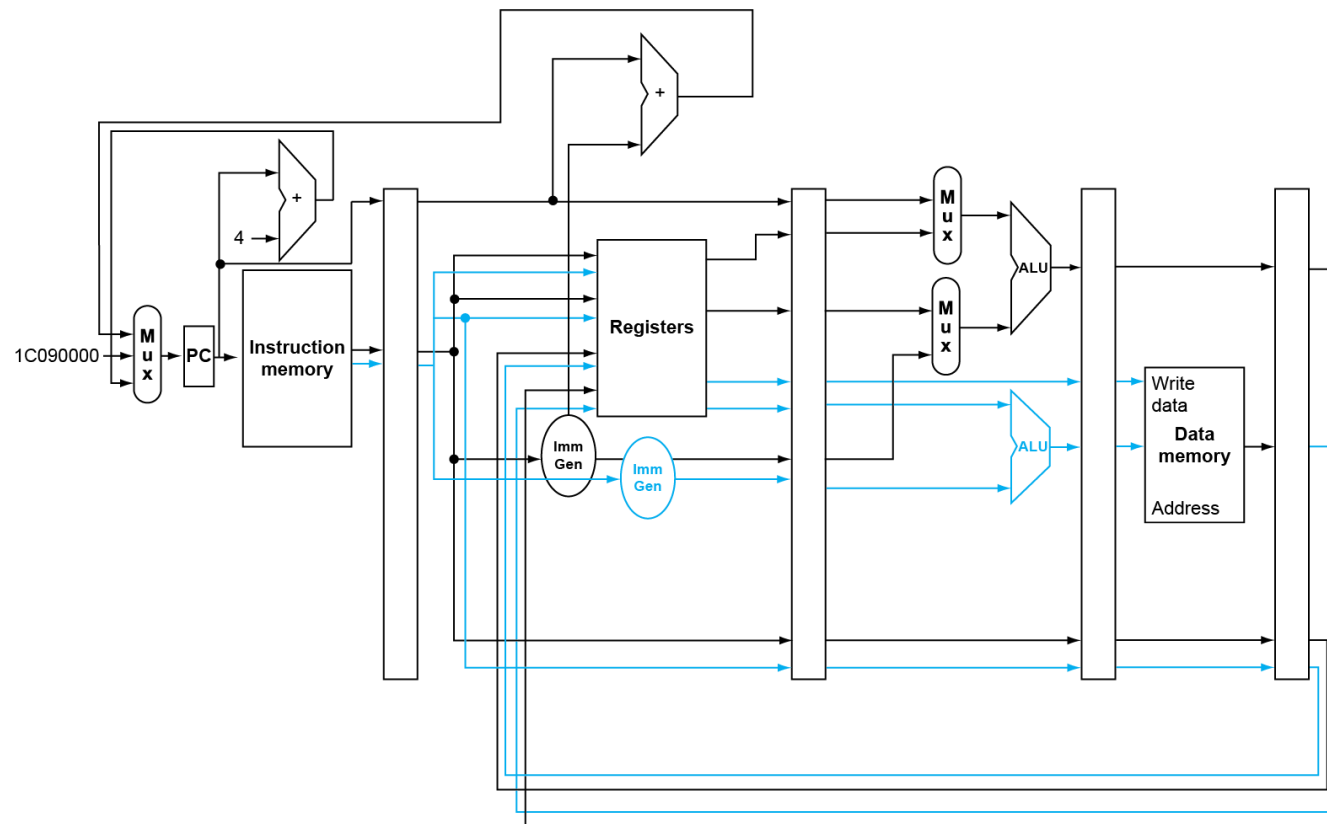


Acelerando máquinas: *Superescalar*

- A estrutura *superescalar* contém múltiplas unidades funcionais que são capazes de fazer a mesma tarefa.
- Isto permite ao processador executar várias instruções concorrentemente, pelo roteamento das instruções às unidades de execução disponíveis.

Ex.:

Tipo-R/I + lw/sw



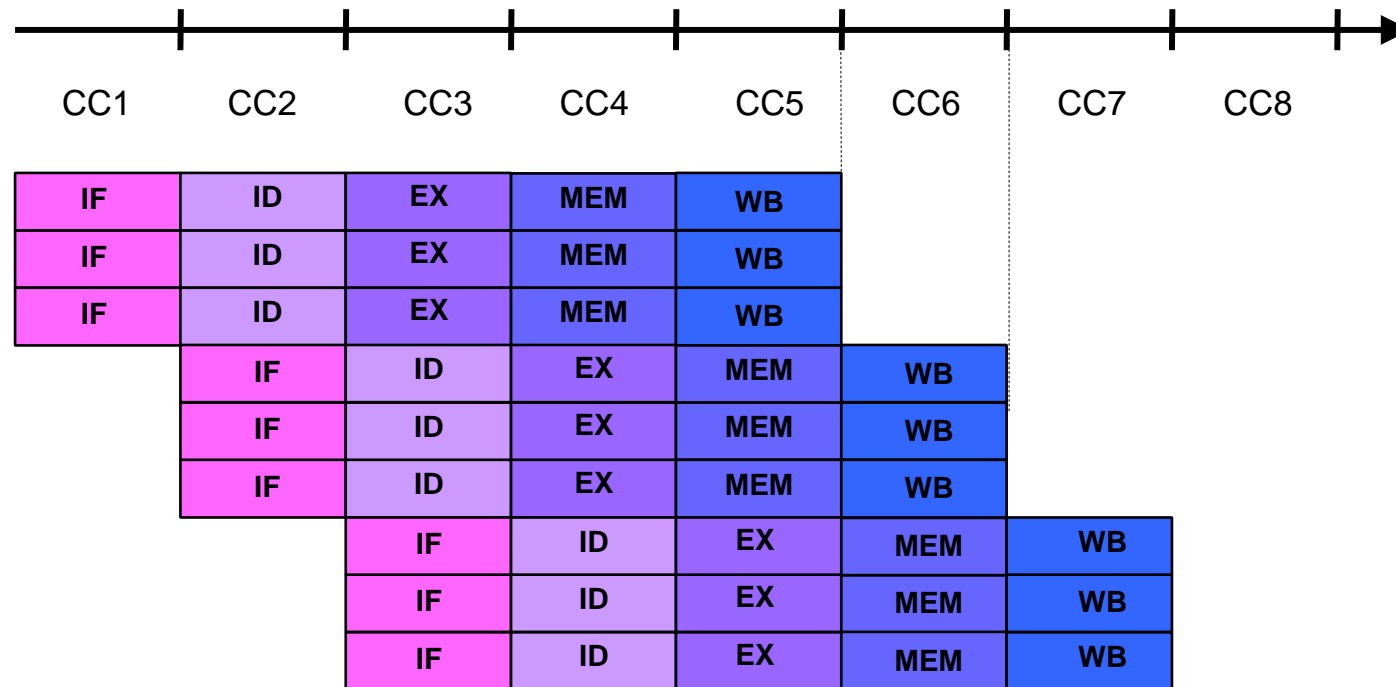


Pipeline Superescalar

Ex.: 3 réplicas da ULA

CPI=?

Obs.: Instruções independentes (sem hazards)

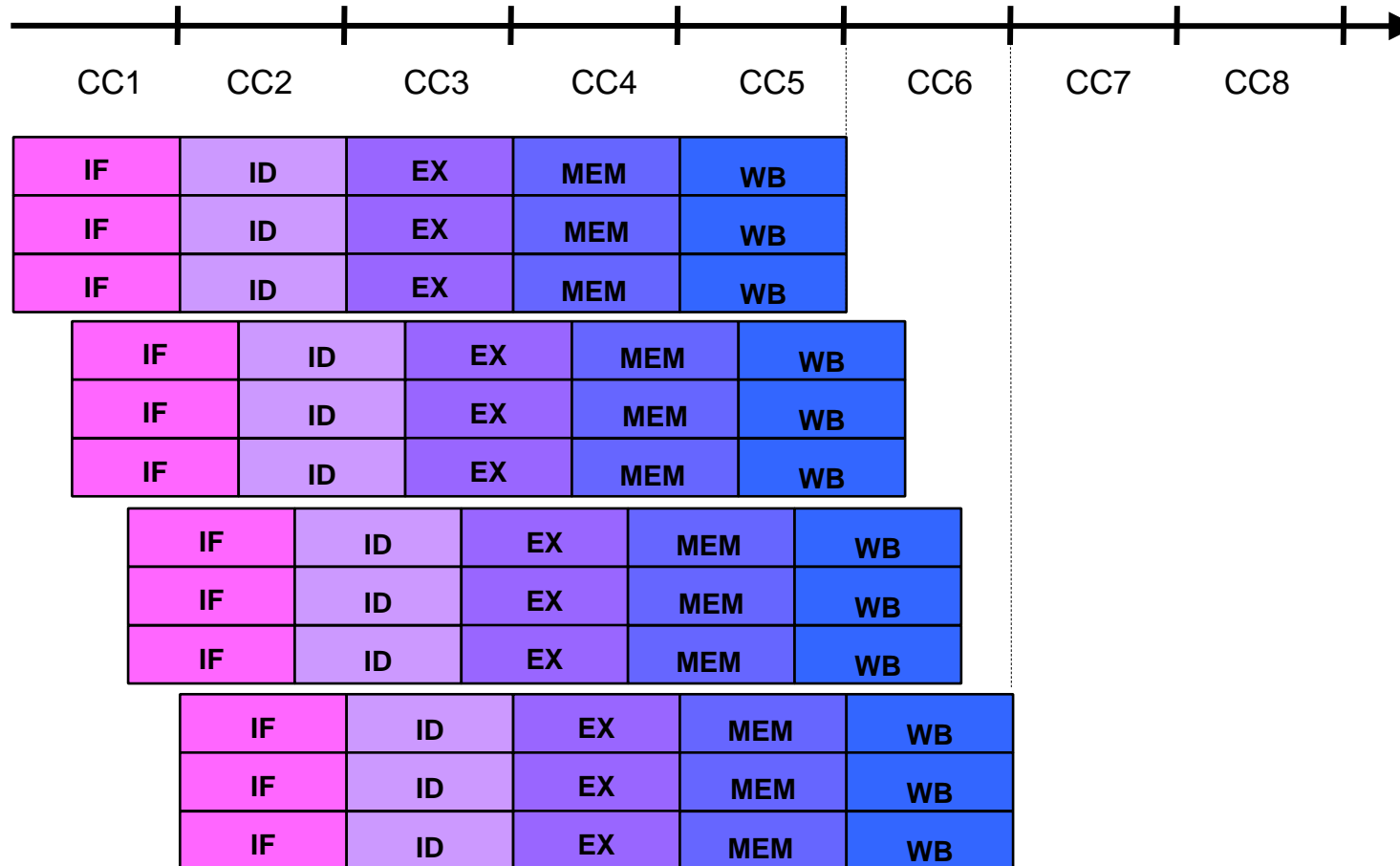


Hyper Threading (Processador Lógico): Duplicação do Banco de Registradores e aproveitamento eficiente das bolhas do pipeline.

→ Consome mais energia sem o ganho de desempenho esperado.



Superpipeline Superescalar



Quantas instruções são completadas a cada ciclo de clock externo?

IPC (Instruções por Ciclo) = ?