

Aulas 16, 17 e 18

- Limitações das arquiteturas *single-cycle*
- Versão de referência de uma arquitetura *multi-cycle*
- Exemplos de funcionamento numa arquitetura *multi-cycle*:
 - Instruções tipo R
 - Acesso à memória – LW
 - Salto condicional – BEQ
 - Salto incondicional – J
- Unidade de controlo para o *datapath multi-cycle*
 - Diagrama de estados da unidade de controlo
- Sinais de controlo e valores do *datapath multi-cycle*
 - Exemplo com execução sequencial de três instruções

José Luís Azevedo, Bernardo Cunha, Arnaldo Oliveira, Pedro Lavrador

Tempo de execução das instruções (*single-cycle*)

- Como visto anteriormente, a **frequência máxima** do relógio de sincronização está limitada pelo **tempo de execução da instrução “mais longa”**
- Os **tempos de execução** das várias instruções suportadas pelo *datapath single-cycle* correspondem ao **somatório dos atrasos introduzidos por cada um dos elementos funcionais envolvidos na execução da instrução**
- Note-se que apenas os elementos funcionais que se encontram em **série** contribuem para aumentar o tempo necessário para concluir a execução da instrução (caminho crítico)

Tempo de execução das instruções

- Consideremos os seguintes tempos de atraso introduzidos por cada um dos elementos funcionais do *datapath single-cycle*:
 - Acesso à memória para leitura - t_{RM}
 - Acesso à memória para preparar a escrita - t_{WM}
 - Acesso ao *register file* para leitura - t_{RRF}
 - Acesso ao *register file* para preparar a escrita - t_{WRF}
 - Operação da ALU - t_{ALU}
 - Operação de um somador - t_{ADD}
 - Unidade de controlo - t_{CNTL}
 - Extensor de sinal - t_{SE}
 - Shift Left 2 - t_{SL2}
 - Tempo de *setup* do PC - t_{stPC}

Tempo de execução das

- Considerando os tempos de atraso de várias instruções suportadas pelo

Instruções tipo R:

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{RRF}, t_{CNTL}) +$

Instrução SW:

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{RRF}, t_{CNTL}, t_{SL2}) +$

Instrução LW:

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{RRF}, t_{CNTL}, t_{SE}) + t_{ALU} + t_{RM} + t_{WRF}$

Instrução BEQ:

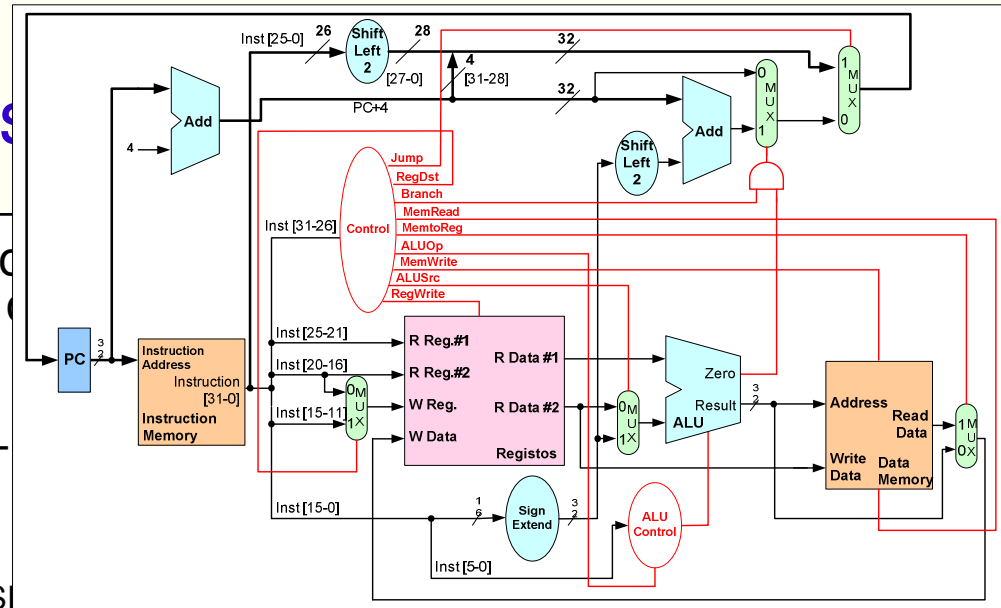
- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(\underbrace{\max(t_{RRF}, t_{CNTL}) + t_{ALU}}_{\text{comparação}}, \underbrace{t_{SE} + t_{SL2} + t_{ADD}}_{\text{cálculo do BTA}}) + t_{stPC}$

Instrução J:

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{CNTL}, t_{SL2}) + t_{stPC}$

Notas:

1. Considera-se que o tempo de cálculo de PC+4 é muito inferior ao somatório dos restantes tempos envolvidos na execução da instrução
2. O tempo t_{CNTL} inclui o tempo de atraso da unidade de controlo da ALU
3. Desprezam-se os tempos de atraso introduzidos pelos *multiplexers*
4. Só se considera o t_{stPC} nas instruções de controlo de fluxo.



Tempo de execução das instruções

- Considerando os tempos de atraso anteriores, os tempos de execução das várias instruções suportadas pelo datapath single cycle serão:

Instruções tipo R:

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{RRF}, t_{CNTL}) + t_{ALU} + t_{WRF}$

Instrução SW:

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{RRF}, t_{CNTL}, t_{SE}) + t_{ALU} + t_{WM}$

Instrução LW:

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{RRF}, t_{CNTL}, t_{SE}) + t_{ALU} + t_{RM} + t_{WRF}$

Instrução BEQ:

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(\underbrace{\max(t_{RRF}, t_{CNTL}) + t_{ALU}}_{\text{comparação}}, \underbrace{t_{SE} + t_{SL2} + t_{ADD}}_{\text{cálculo do BTA}}) + t_{stPC}$

Instrução J:

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{CNTL}, t_{SL2}) + t_{stPC}$

Notas:

- Considera-se que o tempo de cálculo de PC+4 é muito inferior ao somatório dos restantes tempos envolvidos na execução da instrução
- O tempo t_{CNTL} inclui o tempo de atraso da unidade de controlo da ALU
- Desprezam-se os tempos de atraso introduzidos pelos *multiplexers*
- Só se considera o t_{stPC} nas instruções de controlo de fluxo.

Tempo de execução das instruções - exemplo

- Considerem-se os seguintes valores hipotéticos para os tempos de atraso introduzidos por cada um dos elementos funcionais do *datapath single-cycle*:
 - Acesso à memória para leitura (t_{RM}): 5ns
 - Acesso à memória para preparar escrita (t_{WM}): 5ns
 - Acesso ao *register file* para leitura (t_{RRF}): 3ns
 - Acesso ao *register file* para preparar escrita (t_{WRF}): 3ns
 - Operação da ALU (t_{ALU}): 4ns
 - Operação de um somador (t_{ADD}): 1ns
 - *Multiplexers* e restantes elementos funcionais: 0ns
 - Unidade de controlo (t_{CNTL}): 1ns
 - Tempo de *setup* do PC (t_{stPC}): 1ns

Tempo de execução das instruções - exemplo

- **Instruções tipo R:**

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{RFR}, t_{CNTL}) + t_{ALU} + t_{WFR}$
 $= 5 + \max(3, 1) + 4 + 3 = \mathbf{15\ ns}$

- **Instrução SW:**

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{RFR}, t_{CNTL}, t_{SE}) + t_{ALU} + t_{WM}$
 $= 5 + \max(3, 1, 0) + 4 + 5 = \mathbf{17\ ns}$

- **Instrução LW:**

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{RFR}, t_{CNTL}, t_{SE}) + t_{ALU} + t_{RM} + t_{WFR}$
 $= 5 + \max(3, 1, 0) + 4 + 5 + 3 = \mathbf{20\ ns}$

- **Instrução BEQ:**

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(\max(t_{RFR}, t_{CNTL}) + t_{ALU}, t_{SE} + t_{SL2} + t_{ADD}) + t_{stPC}$
 $= 5 + \max(\max(3, 1) + 4, 0 + 0 + 1) + 1 = \mathbf{13\ ns}$

- **Instrução J:**

- $t_{EXEC} = t_{RM} + \max(t_{CNTL}, t_{SL2}) + t_{stPC} = 5 + \max(1, 0) + 1 = \mathbf{7\ ns}$

Limitações das soluções *single-cycle*

- Face à análise anterior, a máxima frequência de trabalho seria:

$$f_{\max} = 1 / 20\text{ns} = 50\text{MHz}$$

- Com a mesma tecnologia, contudo, uma multiplicação ou divisão poderia demorar um tempo da ordem dos 150ns
- Para poder suportar uma ALU com capacidade para efetuar operações de multiplicação/divisão, a frequência de relógio máxima do nosso *datapath* baixaria para 6.66Mhz
- Esta frequência máxima limitaria a eficiência de todas as outras instruções, mesmo que as instruções de multiplicação ou divisão sejam raramente utilizadas
- Uma solução possível, mas tecnicamente complicada, seria usar um relógio de frequência variável, ajustável em função da instrução que vai ser executada

Limitações das soluções *single-cycle*

- Genericamente, o tempo de execução de um programa pode ser calculado como:

$$T_{exec_CPU} = \# Instruções \times CPI \times Clock_Cycle_{CPU}$$

sendo CPI o número médio de ciclos de relógio por instrução na execução do programa em causa; no caso da implementação *single-cycle* o CPI é 1, logo:

$$T_{exec_CPU} = \# Instruções \times Clock_Cycle_{CPU}$$

- O desempenho relativo de um CPU ($CPU_{ANALISE}$) relativamente a outro ($CPU_{REFERENCIA}$) pode ser expresso por:

$$\frac{Desempenho_{CPU_ANALISE}}{Desempenho_{CPU_REFERENCIA}} = \frac{T_{exec_CPU_REFERENCIA}}{T_{exec_CPU_ANALISE}}$$

Limitações das soluções *single-cycle*

- Calcular o ganho de desempenho que se obteria com uma implementação de *clock* variável relativamente a uma com o *clock* fixo, na execução de um programa com o seguinte mix de instruções:
 - 20% de lw, 10% de sw, 50% de tipo R, 15% de branches e 5% de jumps
 - assumindo os tempos execução determinados anteriormente para os vários tipos de instruções (LW: 20ns, SW: 17ns, R-Type: 15ns, BEQ: 13ns, J: 7ns)
- Para este exemplo, o tempo médio de execução de cada instrução num CPU com *clock* variável é calculado como:

$$T_{\text{INSTR}} = 0,2 \times 20 + 0,1 \times 17 + 0,5 \times 15 + 0,15 \times 13 + 0,05 \times 7$$

- O ganho de desempenho do CPU com *clock* variável relativamente a um com *clock* fixo seria então:

$$\frac{Des_{\text{CPU_CLOCK_VARIÁVEL}}}{Des_{\text{CPU_CLOCK_FIXO}}} = \frac{\# \text{ Instruções} \times 20}{\# \text{ Instruções} \times (0,2 \times 20 + 0,1 \times 17 + 0,5 \times 15 + 0,15 \times 13 + 0,05 \times 7)} = 1,29$$

A implementação com *clock* variável não é viável mas permite-nos entender o que está a ser sacrificado quando todas as instruções têm que ser executadas num único ciclo de relógio com dimensão fixa

Limitações das soluções *single-cycle* - conclusões

- Num *datapath* que suporte instruções com complexidade variável, é a **instrução mais lenta que determina a máxima frequência de trabalho**, mesmo que seja um instrução pouco frequente
- Uma vez que o ciclo de relógio é igual ao maior tempo de atraso de todas as instruções, não é útil usar técnicas que reduzam o atraso do caso mais comum mas que não melhorem o maior tempo de atraso (isto é, o atraso do caminho crítico)
 - Isto contraria um dos princípios-chave de desenho: *make the common case fast* (o que é mais comum deve ser mais rápido)
- Elementos funcionais que estejam envolvidos na execução de uma mesma instrução **não podem ser usados para mais do que uma operação por ciclo de relógio** (ex: memória de instruções e de dados, ALU e somadores, ...)

Alternativa às soluções *single-cycle*

- Em vez de desenvolver uma estratégia baseada num relógio de frequência variável, é preferível abdicar do princípio de que todas as instruções devem ser executadas num único ciclo de relógio
- Em alternativa, as várias instruções que compõem o *set* de instruções podem ser executadas em vários ciclos de relógio (*multi-cycle*):
 - A execução da instrução é decomposta num conjunto de operações
 - Cada uma dessas operações faz uso de um elemento funcional fundamental: memória, *register file* ou ALU
 - **Em cada ciclo de relógio poderá ser realizada uma ou mais operações, desde que sejam independentes** (por exemplo, *instruction fetch* e cálculo de PC+4 ou *operand fetch* e cálculo do BTA)
- Desta forma, o período de relógio fica apenas limitado pelo maior dos tempos de atraso de cada um dos elementos funcionais fundamentais
- Para os tempos de atraso que considerámos anteriormente, a máxima frequência de relógio seria assim: **$f_{\max} = 1 / t_{\text{RM}} = 1 / 5\text{ns} = 200\text{MHz}$**

Alternativa às soluções *single-cycle*

- Uma outra vantagem duma solução de execução em vários ciclos de relógio (*multi-cycle*) é que um **mesmo elemento funcional** pode ser utilizado mais do que uma vez, no contexto da execução duma mesma instrução, desde que em ciclos de relógio distintos:
 - A memória externa poderá ser partilhada por instruções e dados
 - A mesma ALU poderá ser usada, para além das operações que já realizava na implementação *single-cycle*, para:
 - Calcular o valor de PC+4
 - Calcular o endereço alvo das instruções de salto condicional (BTA)
- A versão ***multi-cycle*** passará assim a ter:
 - **Uma única memória** para programa e dados (arquitetura Von Neumann)
 - **Uma única ALU**, em vez de uma ALU e dois somadores

O *datapath* Multi-cycle

- A arquitetura *multi-cycle* do MIPS que vamos analisar adota um ciclo de instrução composto por um **máximo de cinco passos distintos**, cada um deles executado em 1 ciclo de relógio
- A distribuição das operações por estes 5 passos tenta distribuir equitativamente o trabalho a realizar em cada ciclo
- Na definição destes passos pressupõe-se que durante um ciclo de relógio apenas é possível efetuar uma das seguintes operações fundamentais:
 - Acesso à memória externa (uma escrita ou uma leitura)
 - Acesso ao *Register File* (uma escrita ou uma leitura)
 - Operação na ALU
- No **mesmo ciclo de relógio**, podem ser realizadas operações em elementos operativos distintos, desde que sejam independentes
 - Exemplos: **um acesso à memória externa e uma operação na ALU**, ou um **acesso ao *Register File* e uma operação na ALU**

O *datapath* Multi-cycle – fases de execução

Fase 1 (memória, ALU):

- *Instruction fetch* e cálculo de PC+4

Fase 2 (unidade de controlo, *register file*, ALU):

- *Instruction decode*, *operand fetch* e cálculo do *branch target address*

Fase 3 (ALU):

- Execução da operação na ALU (instruções tipo R / *addi* / *slti*), **ou**
- Cálculo do endereço de memória (instr. de acesso à memória), **ou**
- Comparação dos operandos - instrução *branch* (conclusão da instrução)

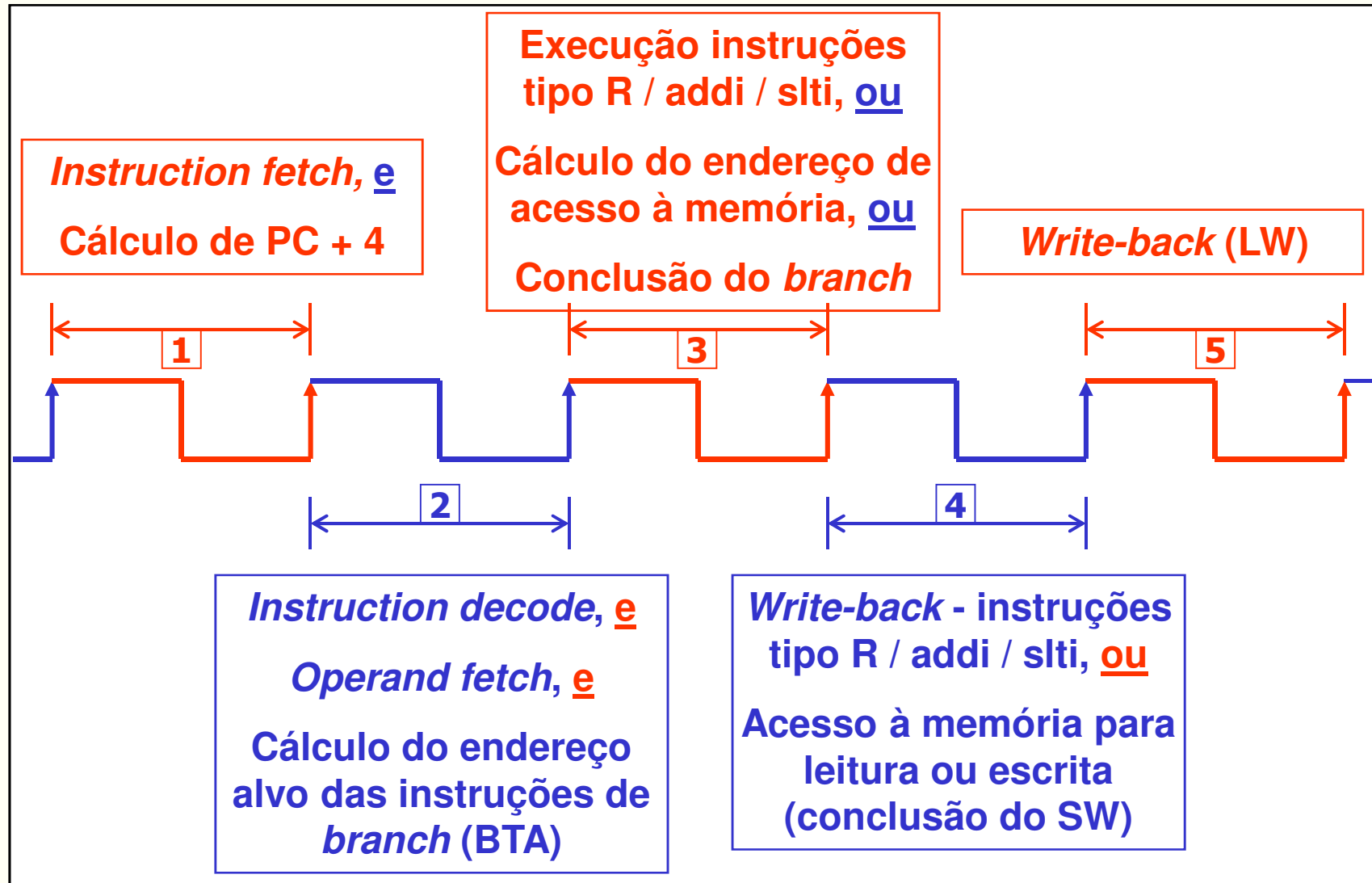
Fase 4 (memória, *register file*):

- Acesso à memória para leitura (instrução *LW*), **ou**
- Acesso à memória para escrita (conclusão da instrução *SW*), **ou**
- Escrita no *Register File* (conclusão das instruções tipo R / *addi* / *slti*: ***write-back***)

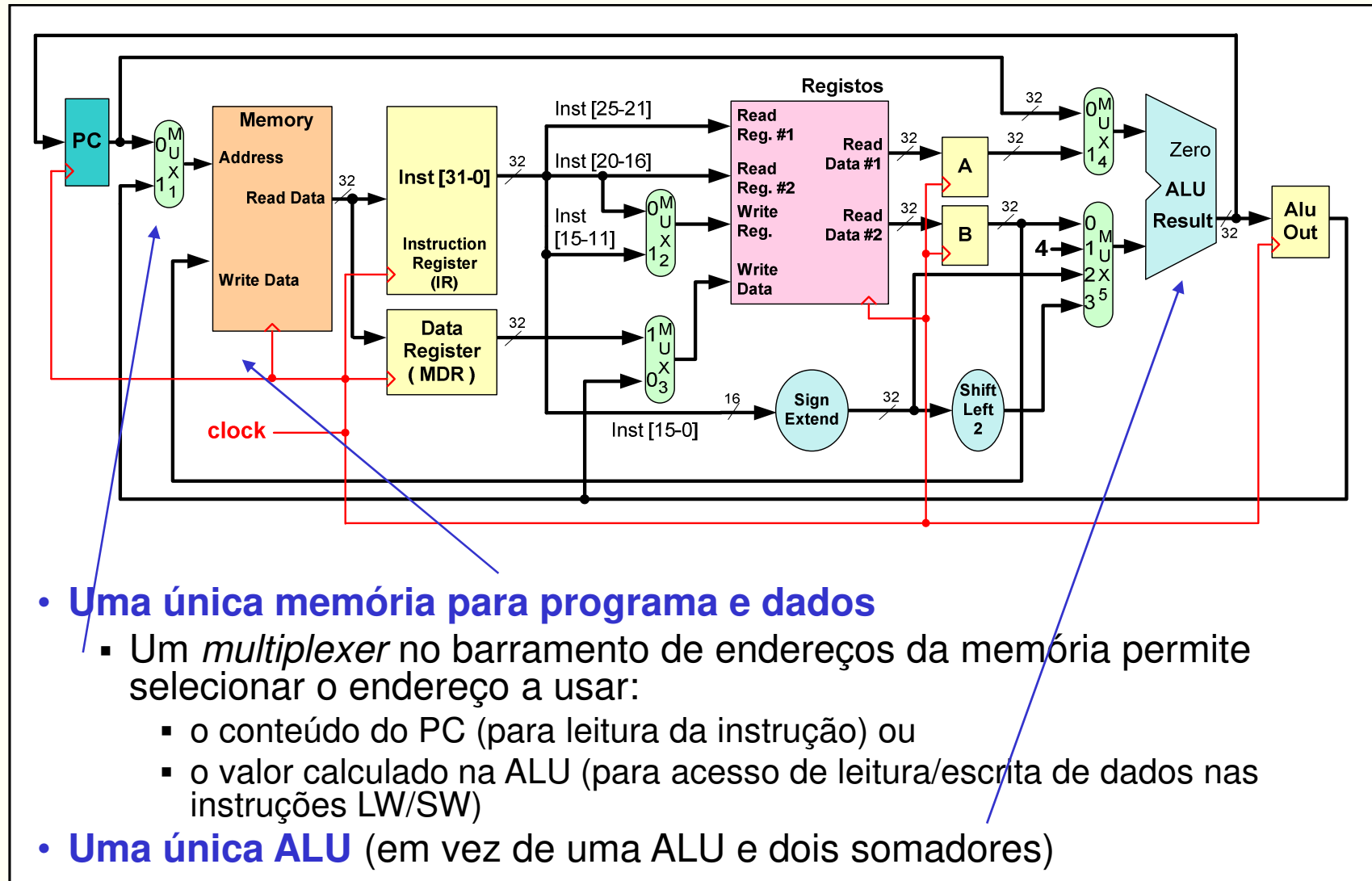
Fase 5 (*register file*):

- Escrita no *Register File* (conclusão da instrução *LW*: ***write-back***)

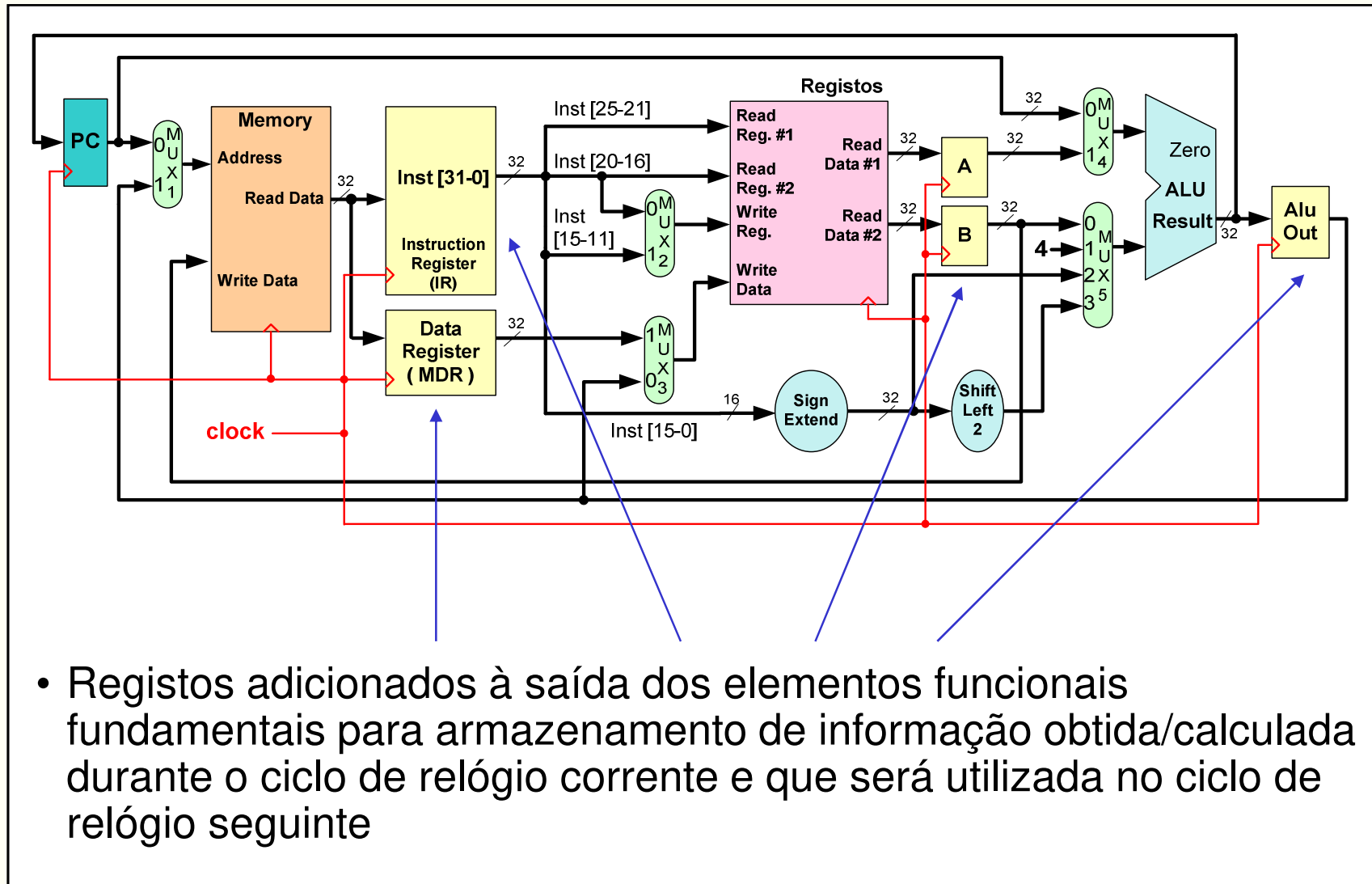
O datapath Multi-cycle



O datapath Multi-cycle (sem BEQ e J)

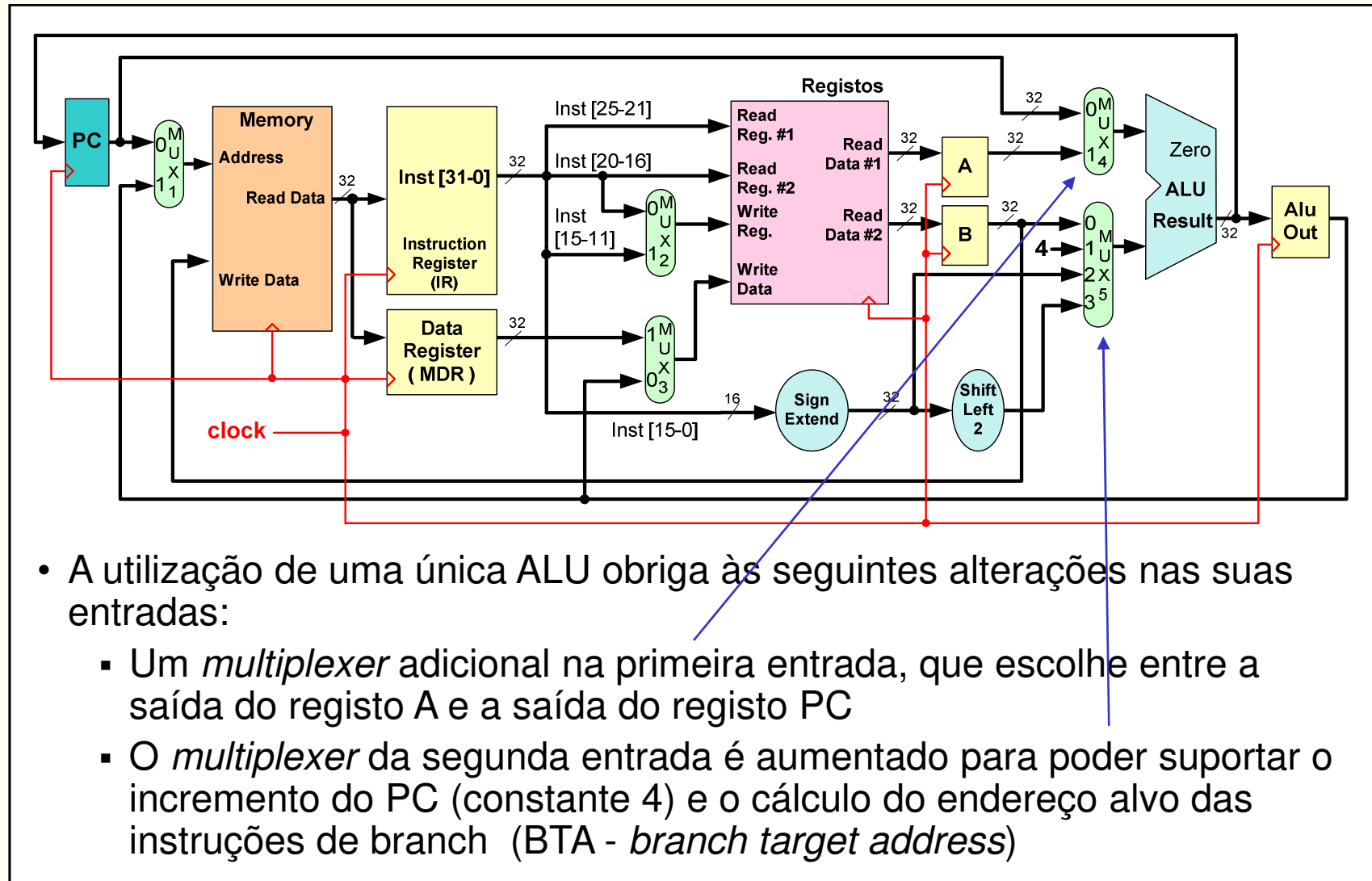


O datapath Multi-cycle (sem BEQ e J)

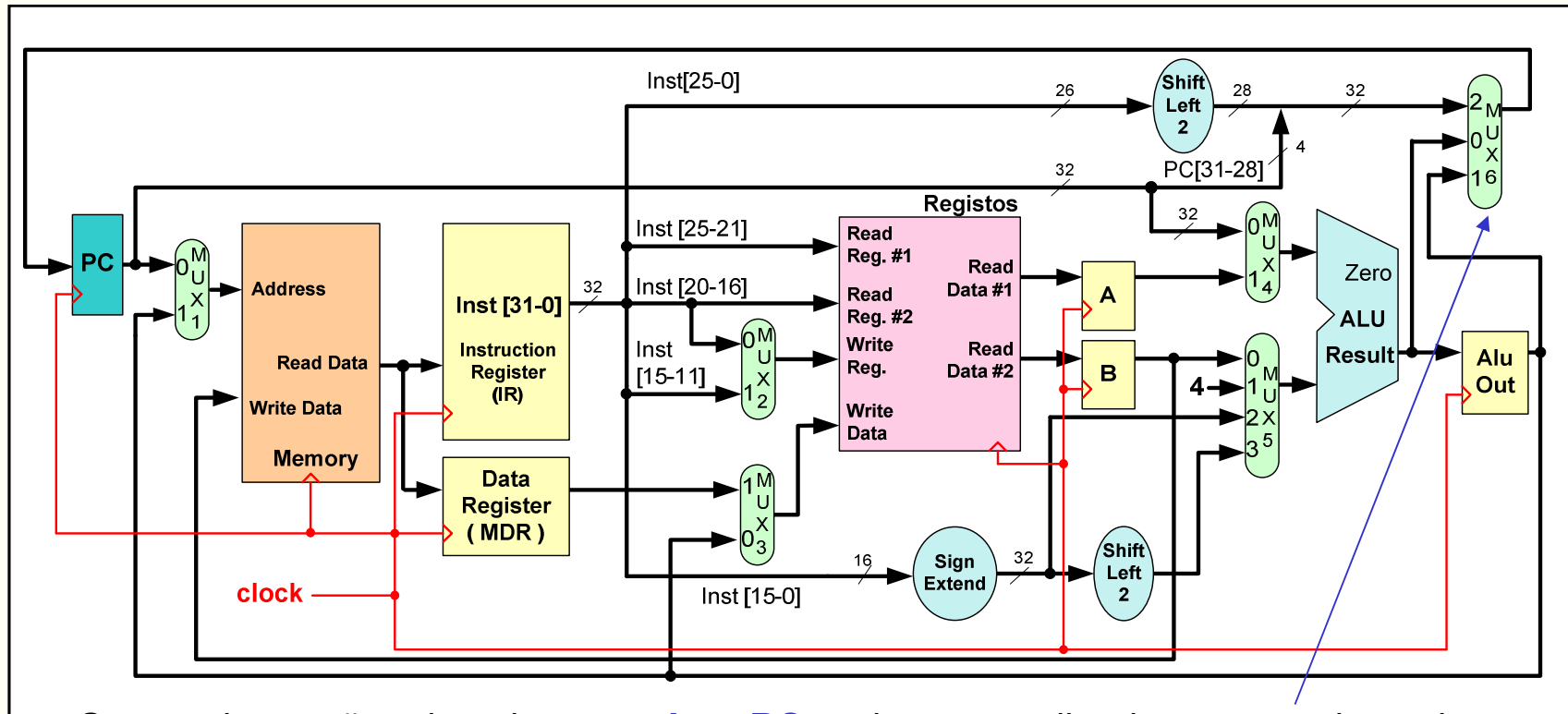


- Registos adicionados à saída dos elementos funcionais fundamentais para armazenamento de informação obtida/calculada durante o ciclo de relógio corrente e que será utilizada no ciclo de relógio seguinte

O datapath Multi-cycle (sem BEQ e J)

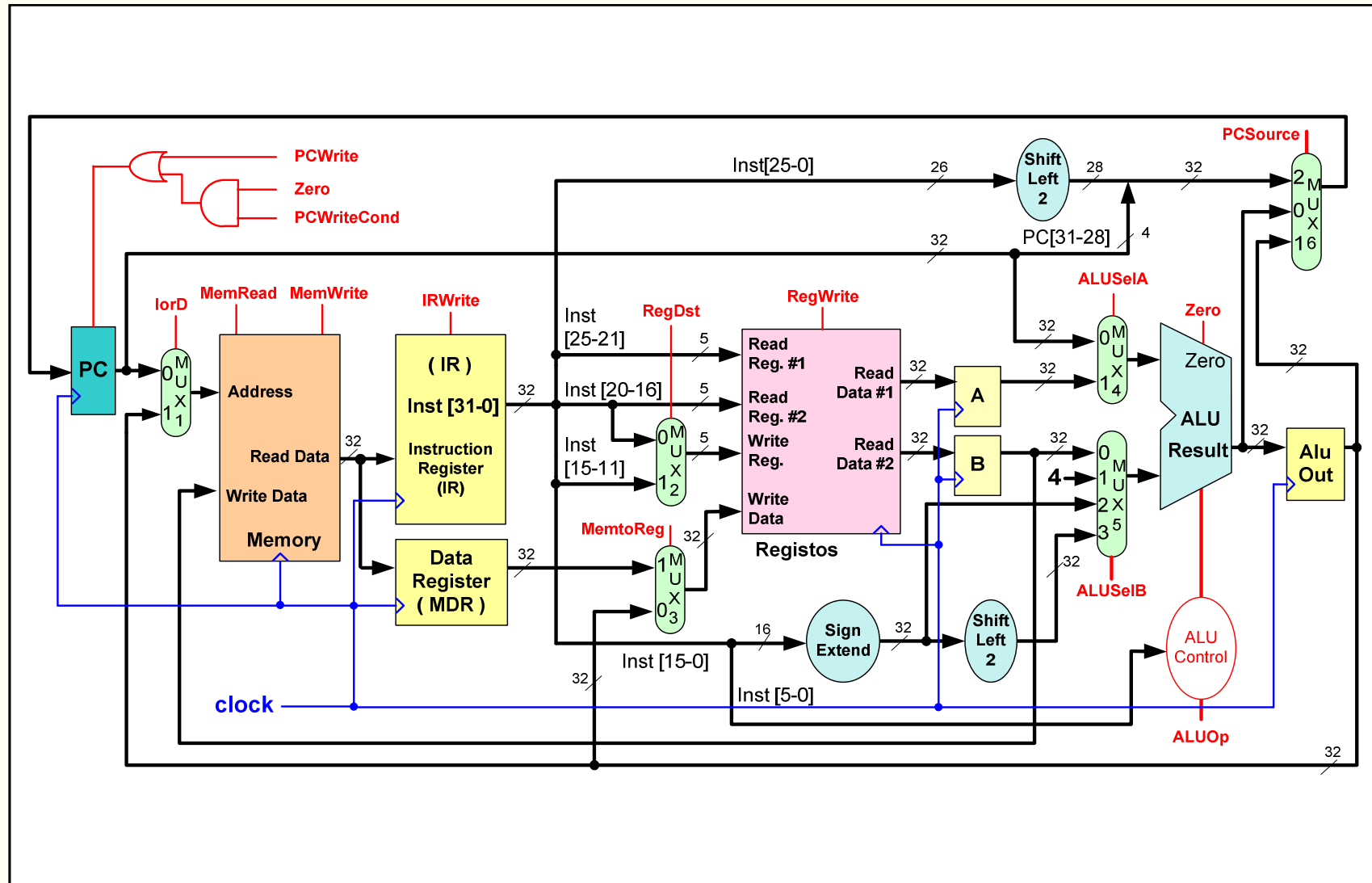


O datapath Multi-cycle com as instruções de salto



- Com as instruções de salto, o **registro PC** pode ser atualizado com um dos valores:
 - A **saída da ALU** que contém o PC+4 calculado durante o *instruction fetch* (na 1ª fase)
 - A saída do registro **ALUOut** que armazena o endereço alvo das instruções de *branch* (BTA) calculado na ALU (na 2ª fase)
 - Jump Target Address** - 26 LSB da instrução multiplicados por 4 (*shift left 2*) concatenados com os 4 MSB do PC atual (o PC foi já incrementado na 1ª fase)

O datapath Multi-cycle, com os sinais de controlo



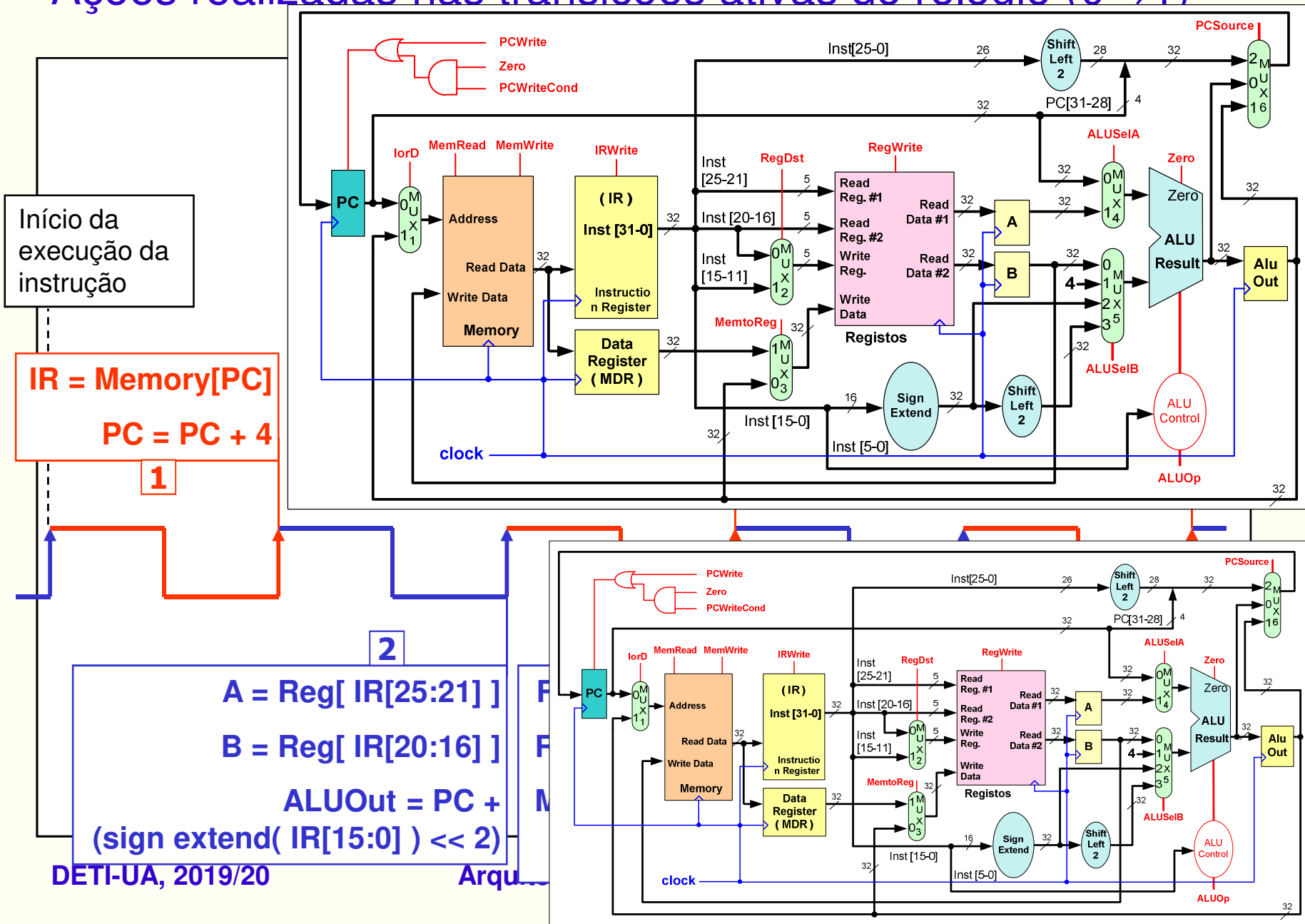
O datapath Multi-cycle – sinais de controlo

Sinal	Efeito quando não activo ('0')	Efeito quando activo ('1')
MemRead	Nenhum	O conteúdo da memória no endereço indicado é apresentado à saída
MemWrite	Nenhum	O conteúdo do registo de memória, cujo endereço é fornecido, é substituído pelo valor apresentado à entrada
ALUSelA	O primeiro operando da ALU é o PC	O primeiro operando da ALU provém do registo indicado no campo rs
RegDst	O endereço do registo destino provém do campo rt	O endereço do registo destino provém do campo rd
RegWrite	Nenhum	O registo indicado no endereço de escrita é alterado pelo valor presente na entrada de dados
MemtoReg	O valor apresentado para escrita no registo destino provém da ALU	O valor apresentado na entrada de dados do Register File provém do Data Register
lorD	O PC é usado para fornecer o endereço à memória externa	A saída do registo AluOut é usada para providenciar um endereço para a memória externa
IRWrite	Nenhum	O valor lido da memória externa é escrito no Instruction Register
PCWrite	Nenhum	O PC é actualizado incondicionalmente na próxima transição activa do sinal de relógio
PCWriteCond	Nenhum	O PC é actualizado condicionalmente na próxima transição activa do relógio

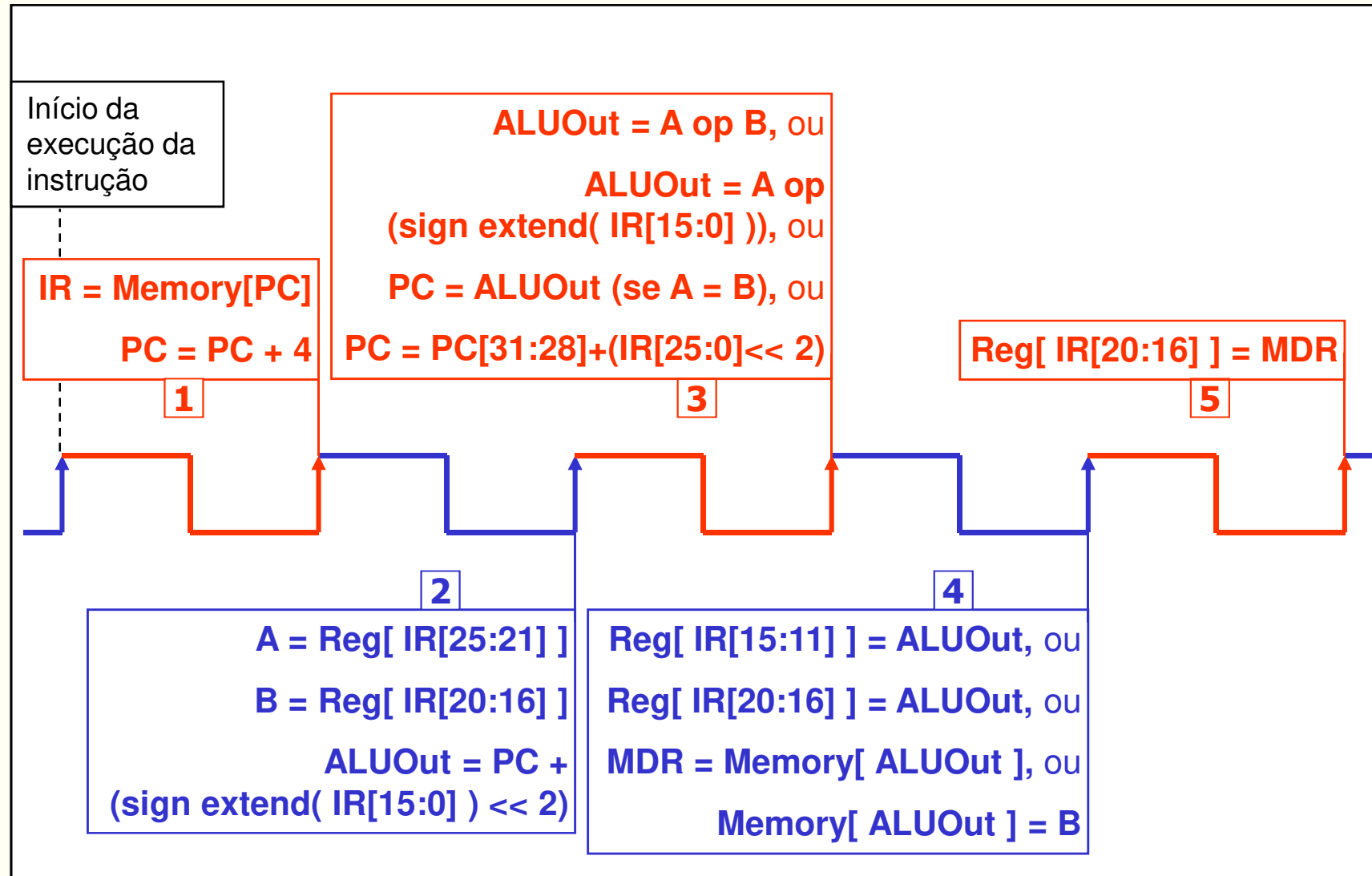
O datapath Multi-cycle – sinais de controlo

Sinal	Valor	Efeito
ALUSelB	00	A segunda entrada da ALU provém do registo indicado pelo campo rt
	01	A segunda entrada da ALU é a constante 4
	10	A segunda entrada da ALU é a versão de sinal estendido dos 16 bits menos significativos do IR (instruction register)
	11	A segunda entrada da ALU é a versão de sinal estendido e deslocada de dois bits, dos 16 bits menos significativos do IR (instruction register)
ALUOp	00	ALU efetua uma adição
	01	ALU efetua uma subtração
	10	O campo "function code" da instrução determina qual a operação da ALU
	11	ALU efetua um SLT
PCSource	00	O valor do PC é atualizado com o resultado da ALU (IF)
	01	O valor do PC é atualizado com o resultado da AluOut (Branch)
	10	O valor do PC é atualizado com o valor target do Jump
	11	Não usado

Ações realizadas nas transições ativas do relógio (0→1)



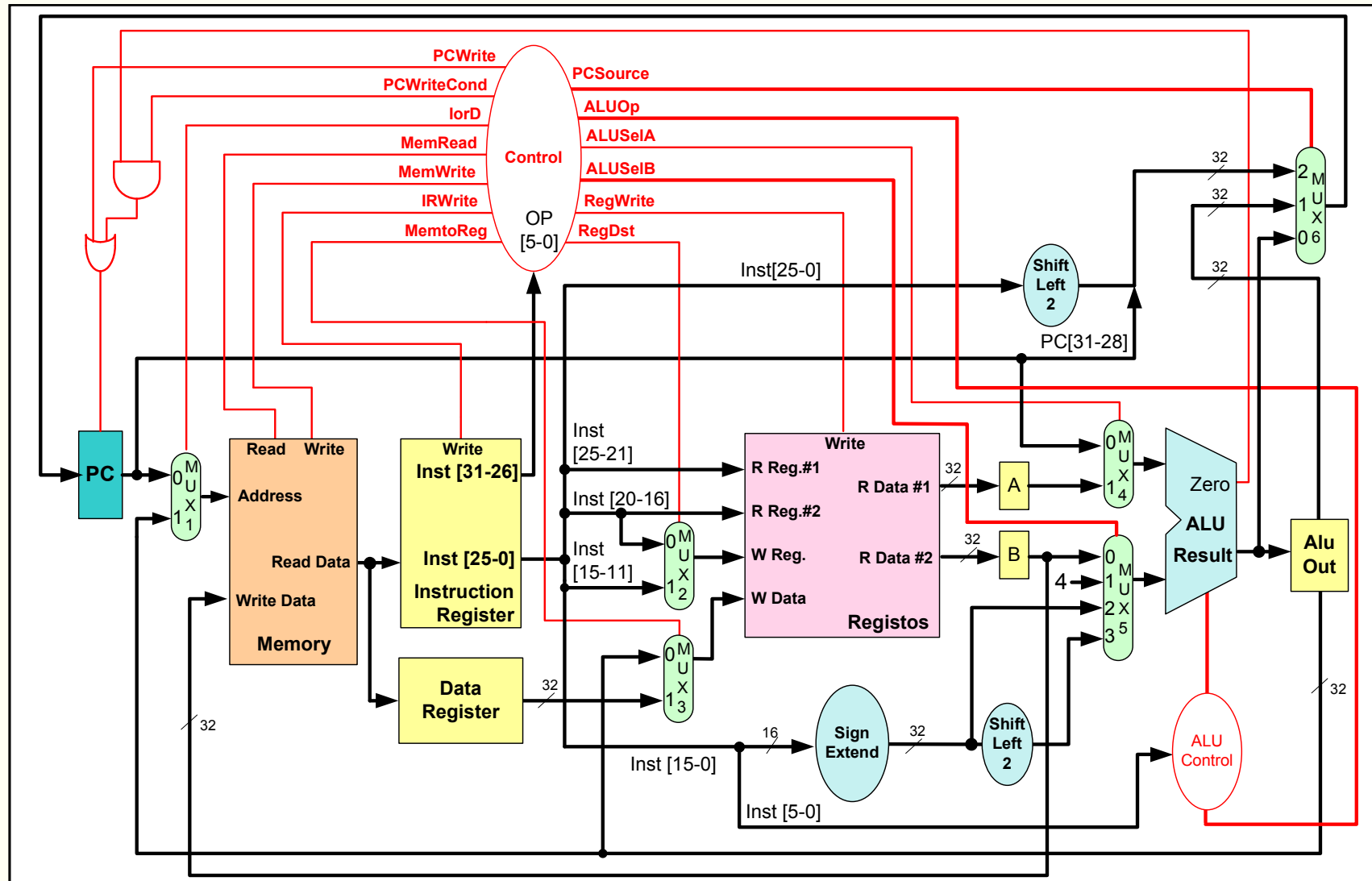
Ações realizadas nas transições ativas do relógio (0→1)



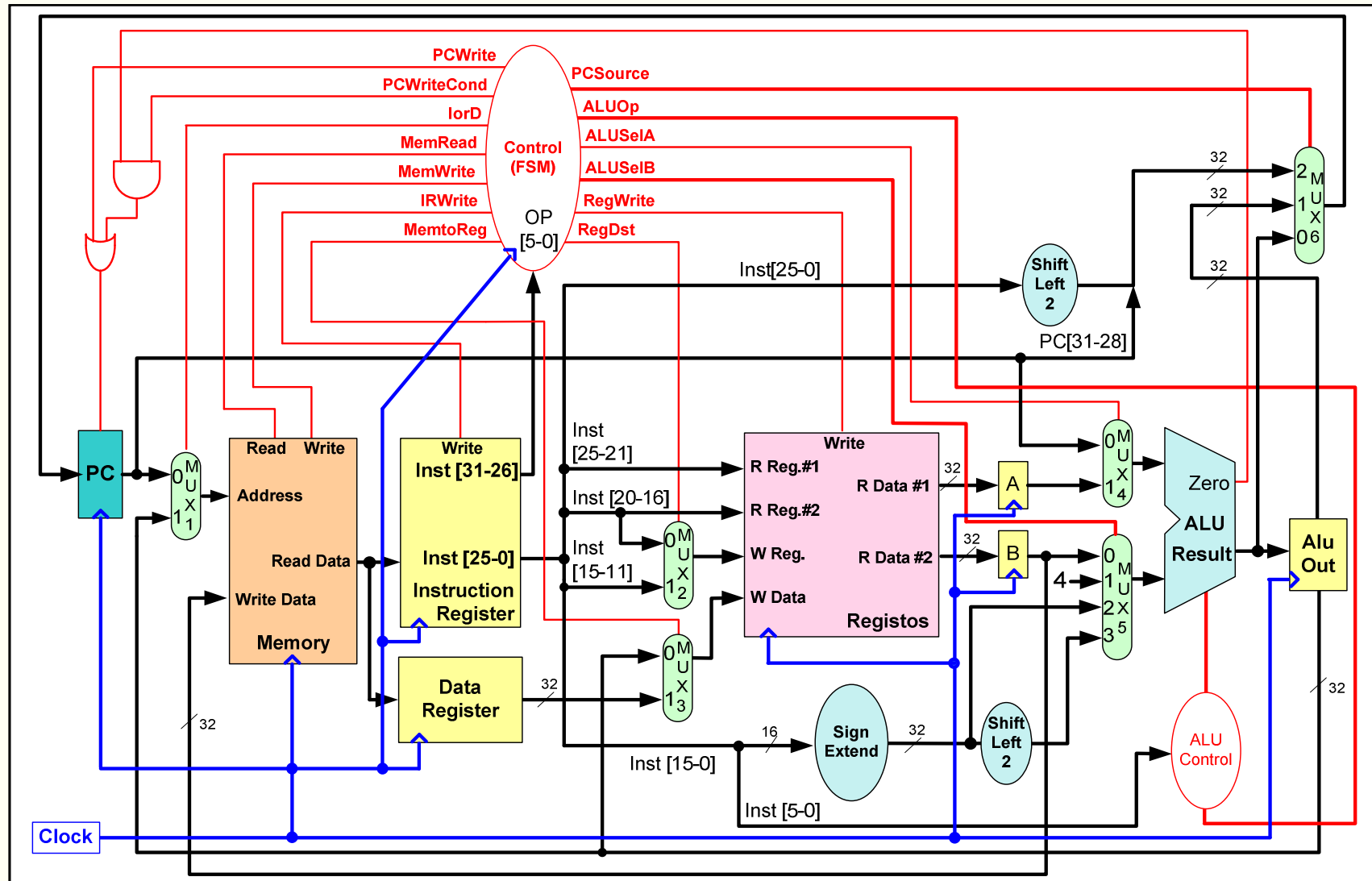
Ações realizadas nas transições ativas do relógio (0→1)

Passo	Ação p/ as R-Type / ADDI / SLTI	Ação p/ instruções que referenciam a memória	Ação p/ os branches
Instruction fetch	$IR = Memory[PC]$ $PC = PC + 4$		
Instruction decode, register fetch, cálculo do BTA	$A = Reg[IR[25:21]]$ $B = Reg[IR[20:16]]$ $ALUOut = PC + (sign\ extended(IR[15:0]) \ll 2)$		
Execução (tipoR/addi/slti), cálculo de endereços ou conclusão dos branches	$ALUOut = A \text{ op } B$ ou $ALUOut = A \text{ op } extend(IR[15:0])$	$ALUOut = A + sign\ extended(IR[15:0])$	If (A == B) then PC = ALUOut
Acesso à memória (leitura-LW; ou escrita-SW) ou escrita no File Register (write-back, instruções tipo R/addi/slti)	Tipo R: $Reg[IR[15:11]] = ALUOut$ ADDI / SLTI: $Reg[IR[20:16]] = ALUOut$	MDR = Memory[ALUOut] ou Memory[ALUOut] = B	
Escrita no File Register (write-back, instrução LW)		$Reg[IR[20:16]] = MDR$	

O datapath Multi-cycle completo



O datapath Multi-cycle completo



Módulo de atualização do PC – VHDL

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity PCupdate is
  port (clk      : in  std_logic;
        reset    : in  std_logic;
        zero     : in  std_logic;
        PCSource : in  std_logic_vector(1 downto 0);
        PCWrite  : in  std_logic;
        PCWriteCond : in std_logic;
        PC4      : in  std_logic_vector(31 downto 0);
        BTA      : in  std_logic_vector(31 downto 0);
        jAddr    : in  std_logic_vector(25 downto 0);
        pc       : out std_logic_vector(31 downto 0));
end PCupdate;
```

Módulo de atualização do PC – VHDL

```
architecture Behavioral of PCupdate is
    signal s_pc : std_logic_vector(31 downto 0);
    signal s_pcEnable : std_logic;
begin
    s_pcEnable <= PCWrite or (PCWriteCond and zero);
    process(clk)
    begin
        if(rising_edge(clk)) then
            if(reset = '1') then
                s_pc <= (others => '0');
            elsif(s_pcEnable = '1') then
                case PCSource is
                    when "01" => -- BTA
                        s_pc <= BTA;
                    when "10" => -- JTA
                        s_pc <= s_pc(31 downto 28) & jAddr & "00";
                    when others => -- PC + 4
                        s_pc <= PC4;
                end case;
            end if;
        end if;
    end process;
    pc <= s_pc;
end Behavioral;
```

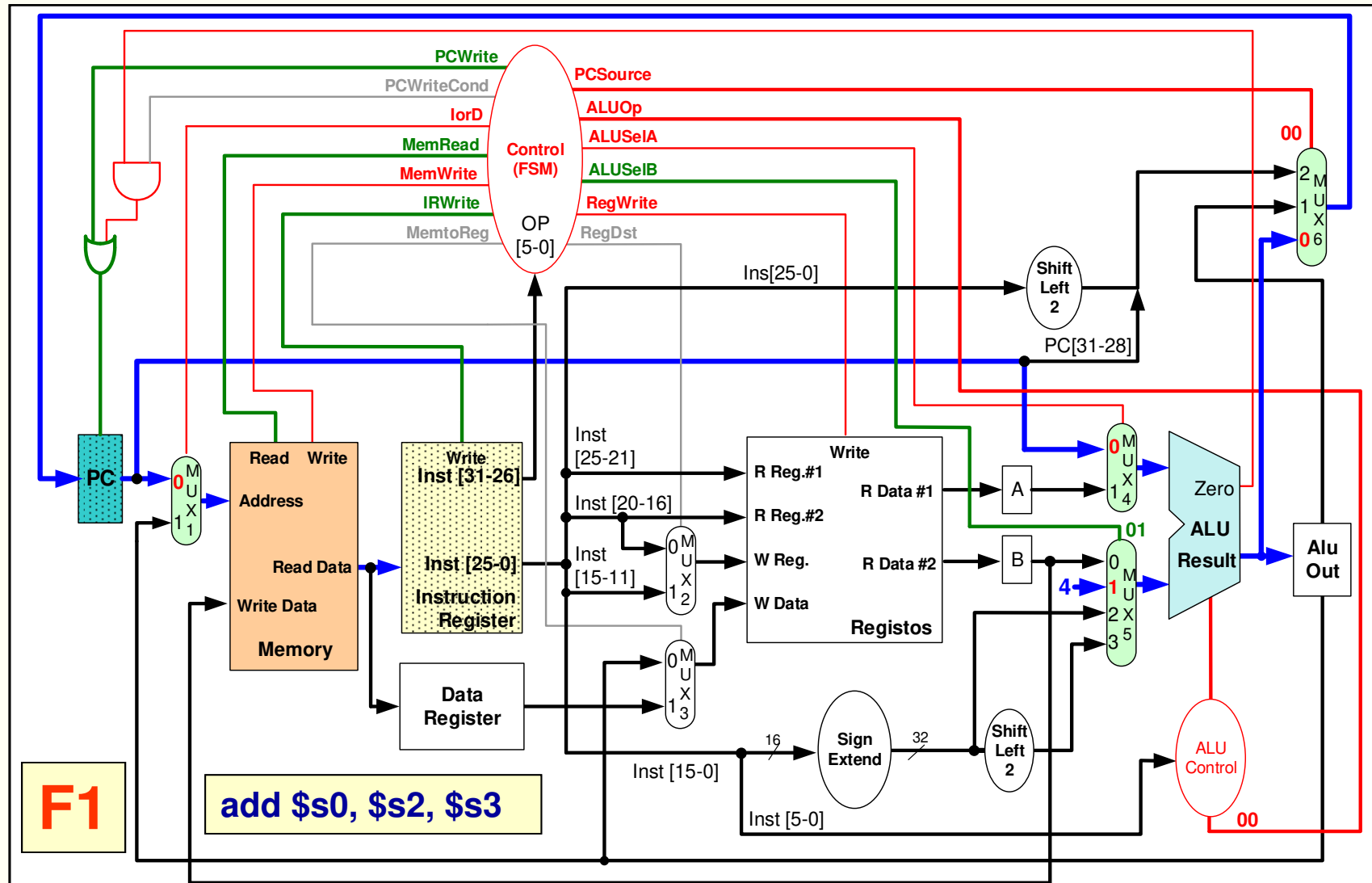
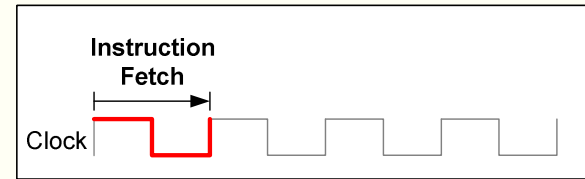
Exemplos de funcionamento

- Nos exemplos seguintes as cores indicam o estado, o valor ou a utilização dos sinais de controlo, barramentos e elementos de estado/combinatórios. O significado atribuído a cada cor é:
- Sinais de controlo:
 - **vermelho** → 0
 - **verde** → diferente de zero
 - cinzento → “don’t care”
- Barramentos:
 - **azul** → Relevantes no contexto do ciclo da instrução
 - **preto** → Não relevantes no contexto do ciclo da instrução
- Elementos de estado / combinatórios:
 - fundo branco → Não usados no contexto do ciclo da instrução
 - fundo de cor → Usados no contexto do ciclo da instrução
- Elementos de estado:
 - fundo de cor com textura → Escritos no final do ciclo de relógio corrente

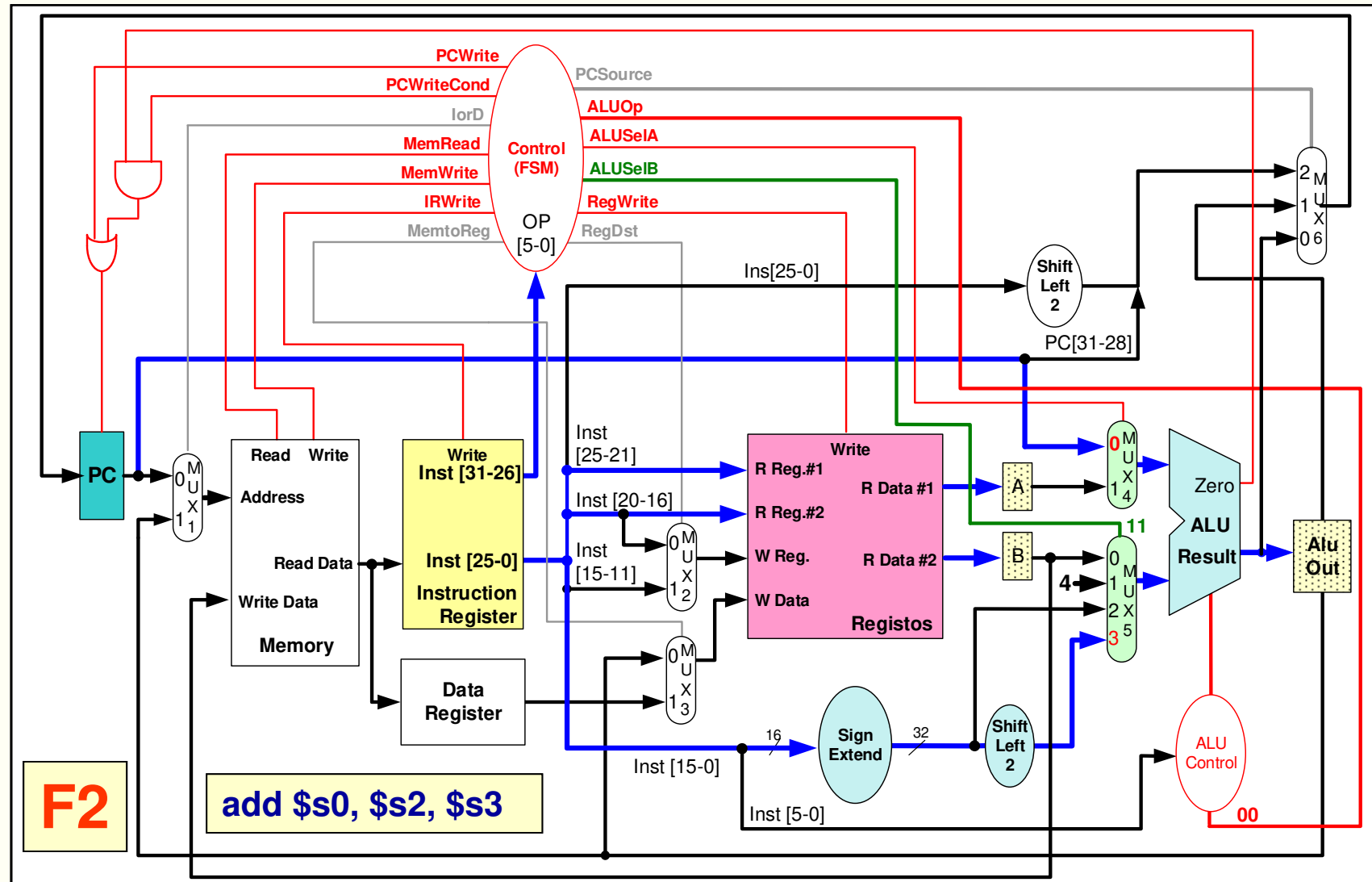
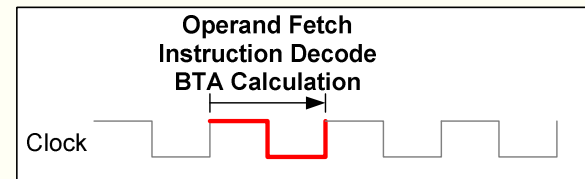
Funcionamento do *datapath* nas instruções do tipo R

- Fase 1:
 - *Instruction fetch*
 - Cálculo de PC+4
- Fase 2:
 - Leitura dos registos
 - Descodificação da instrução
 - Cálculo do endereço-alvo das instruções de *branch*
- Fase 3:
 - Cálculo da operação na ALU
- Fase 4:
 - *Write-back*

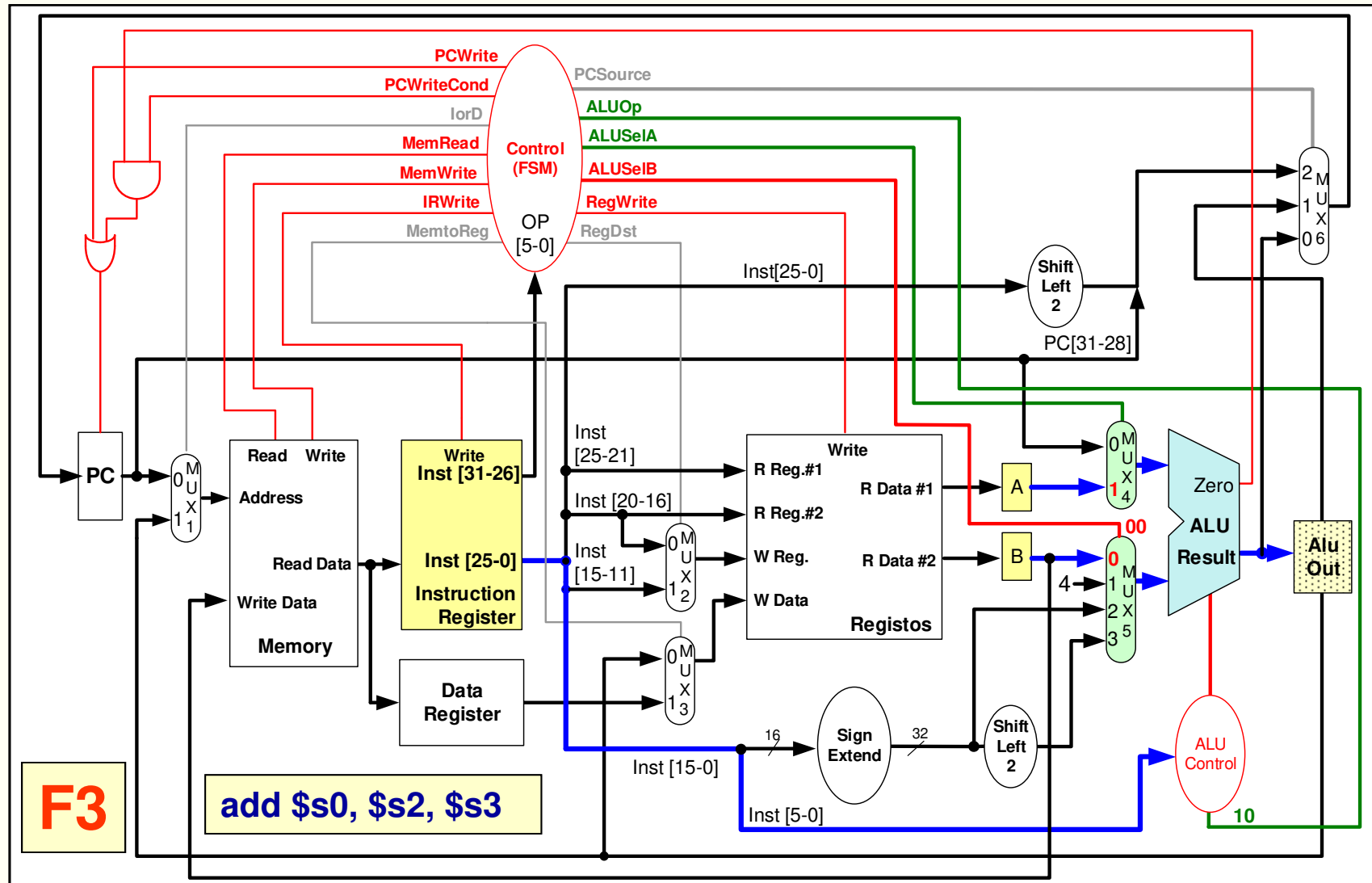
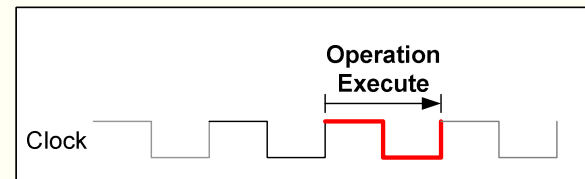
Instruções do tipo R



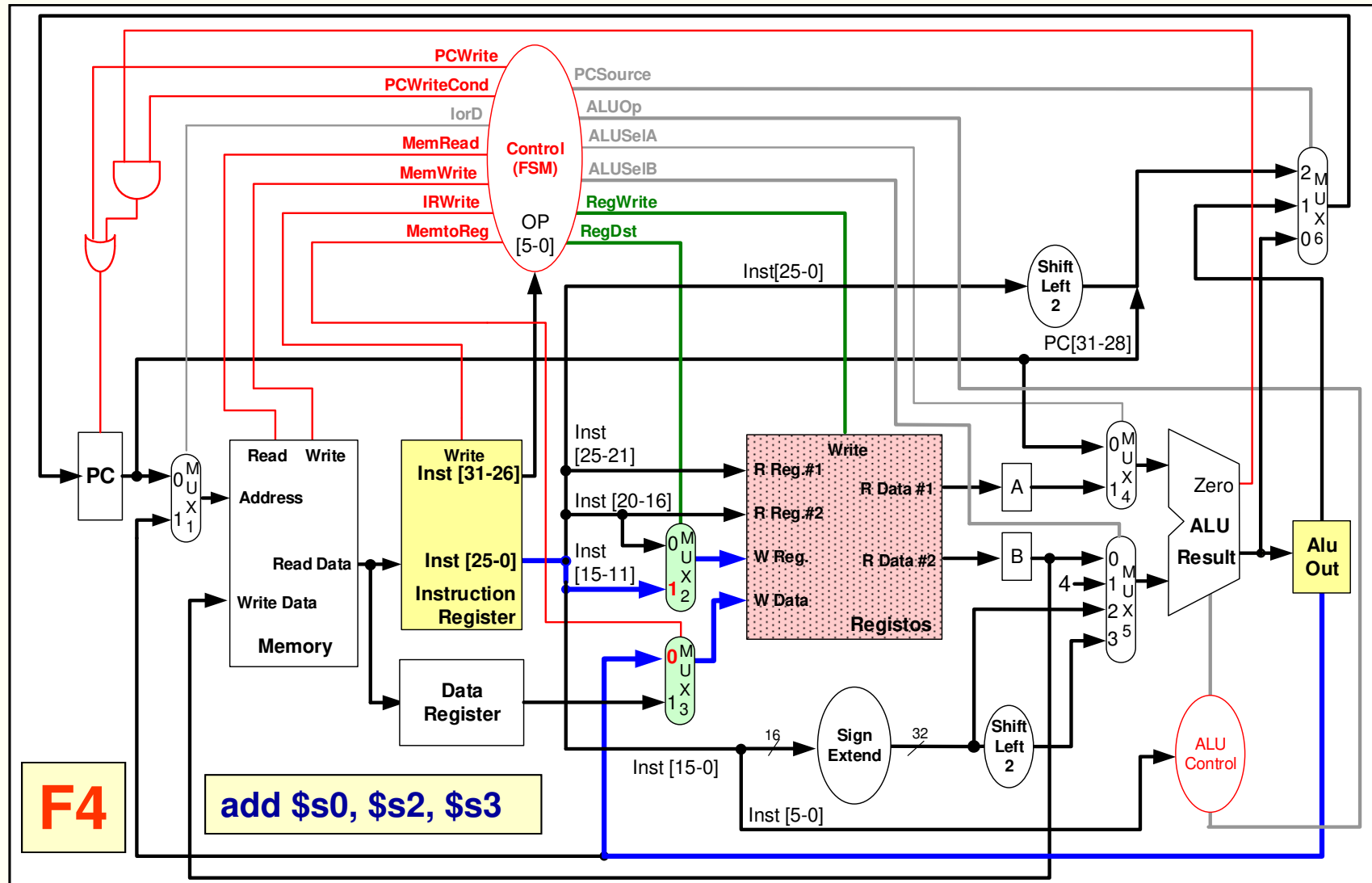
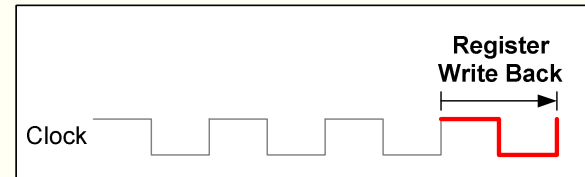
Instruções do tipo R



Instruções do tipo R



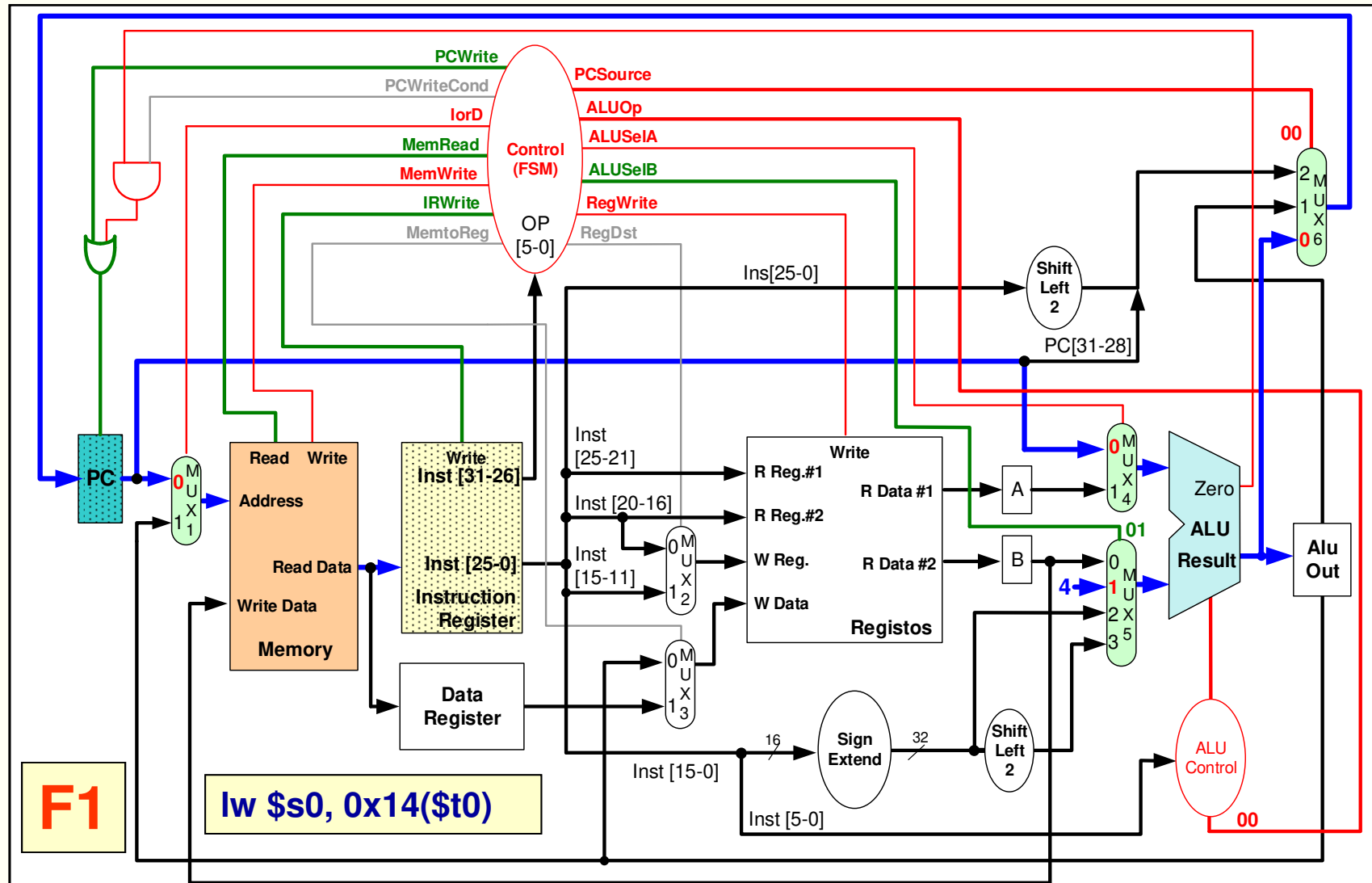
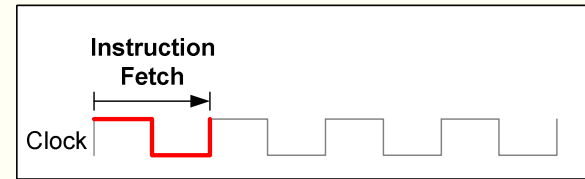
Instruções do tipo R



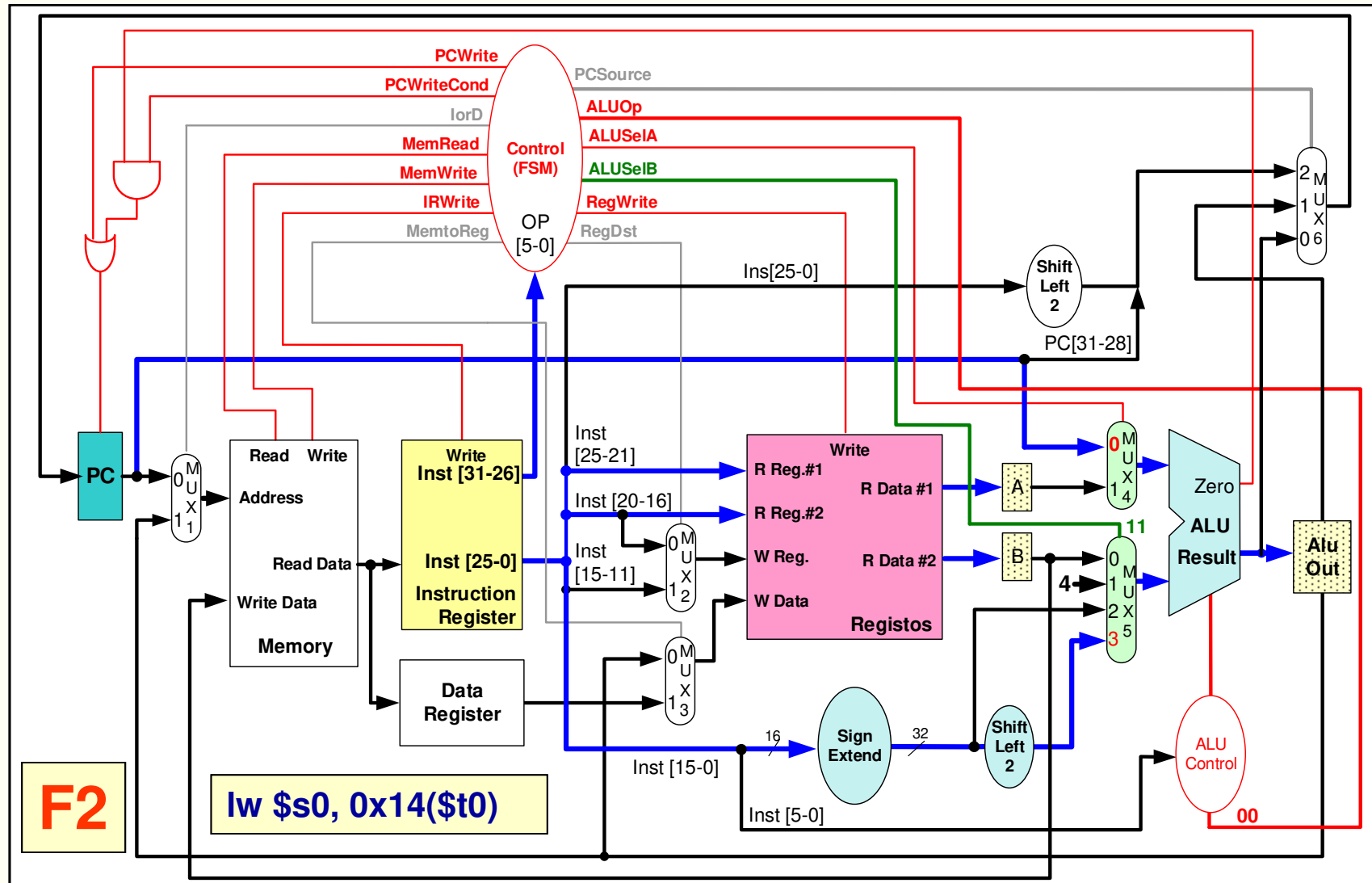
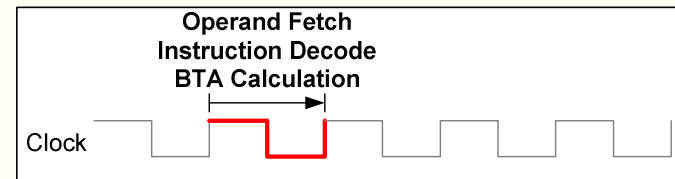
Funcionamento do *datapath* na instrução LW

- Fase 1:
 - *Instruction fetch*
 - Cálculo de PC+4
- Fase 2:
 - Leitura dos registos
 - Descodificação da instrução
 - Cálculo do endereço-alvo das instruções de *branch*
- Fase 3:
 - Cálculo na ALU do endereço a aceder na memória
- Fase 4:
 - Leitura da memória
- Fase 5:
 - *Write-back*

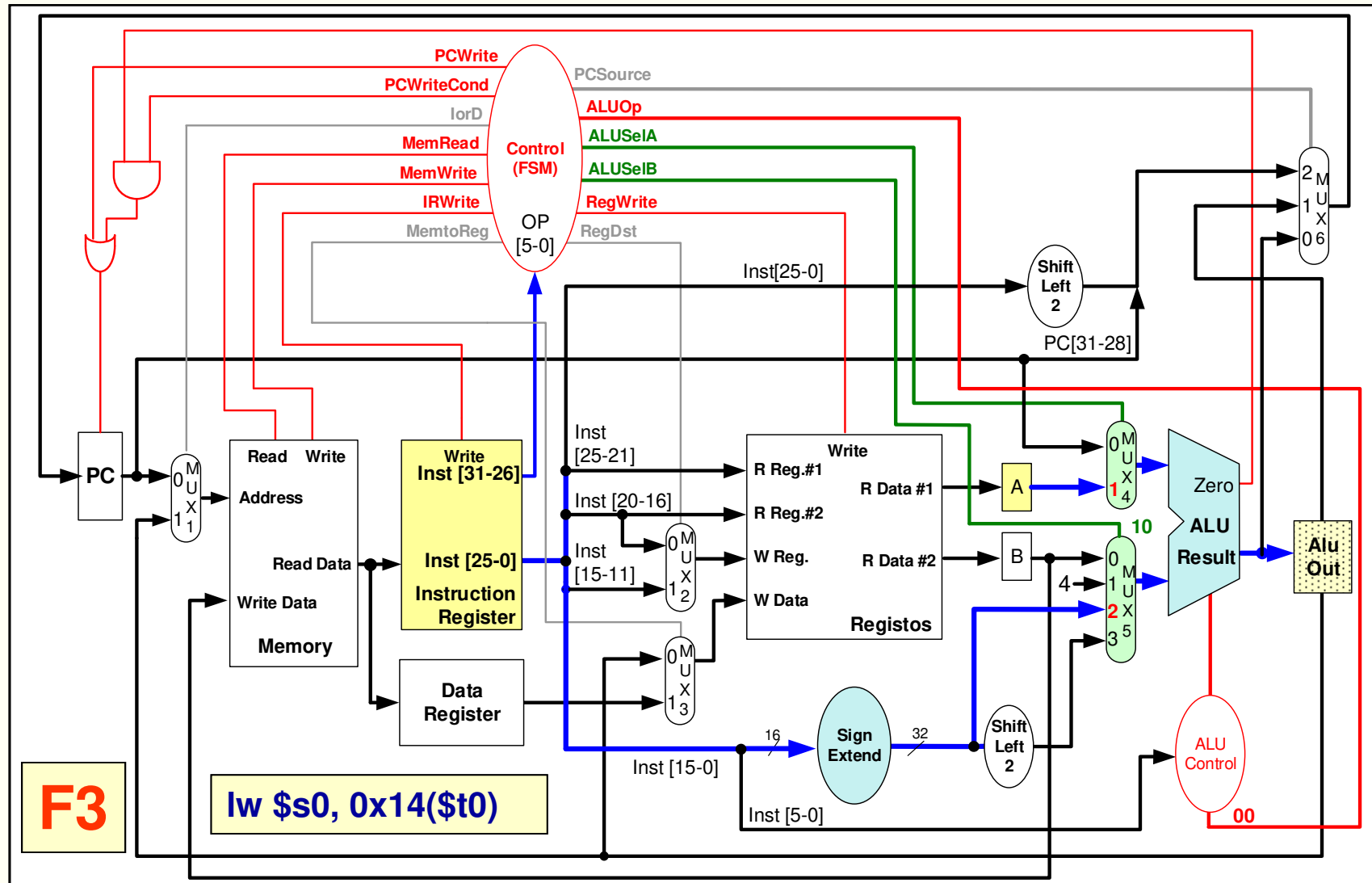
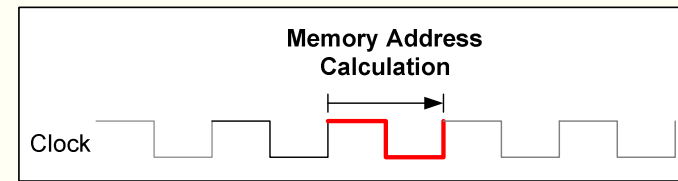
Instrução LW



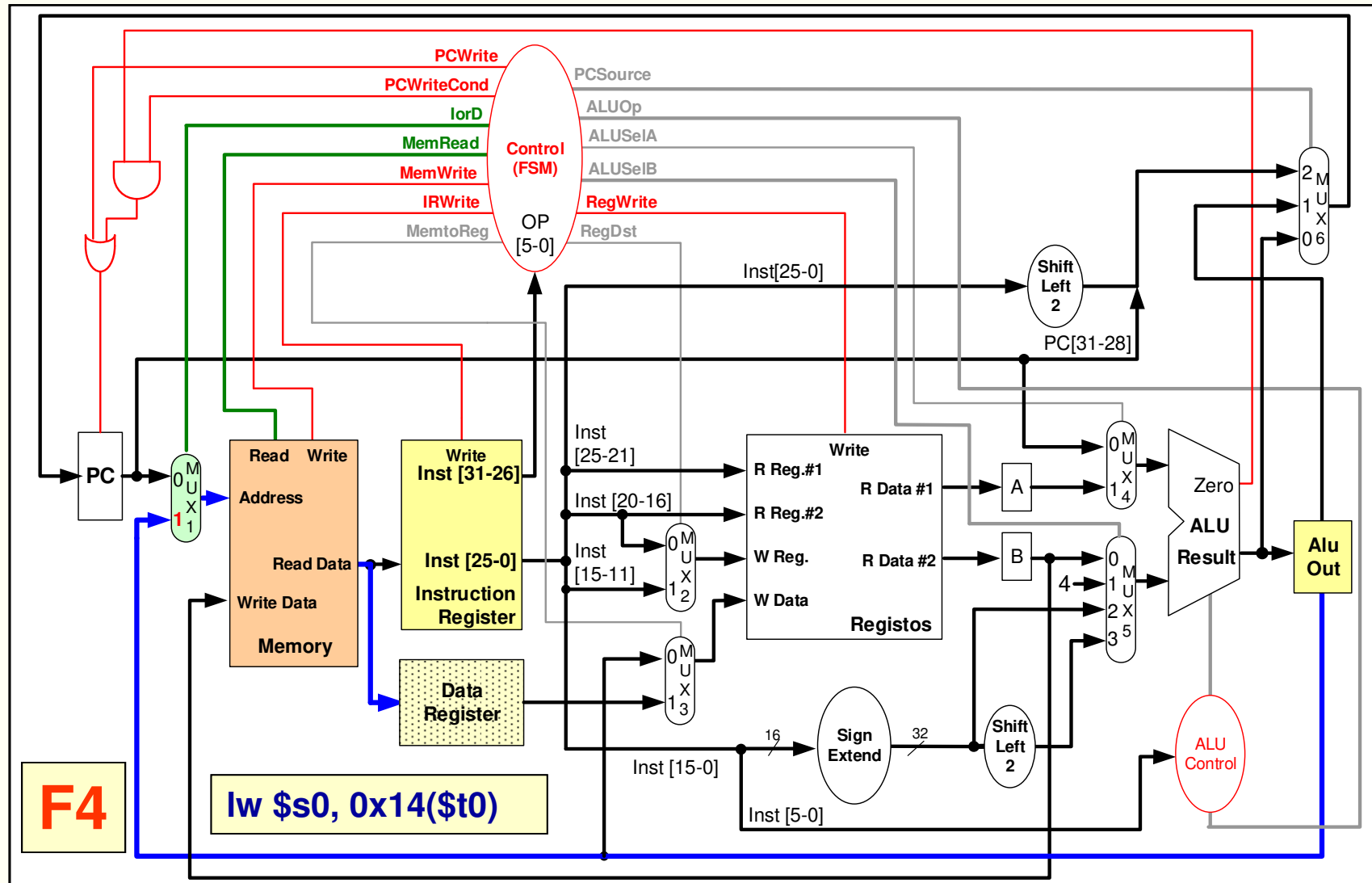
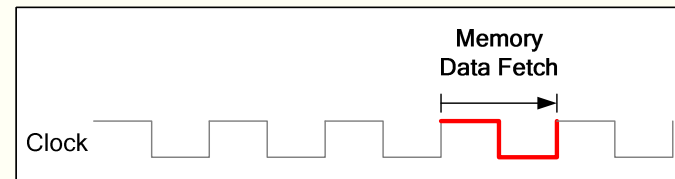
Instrução LW



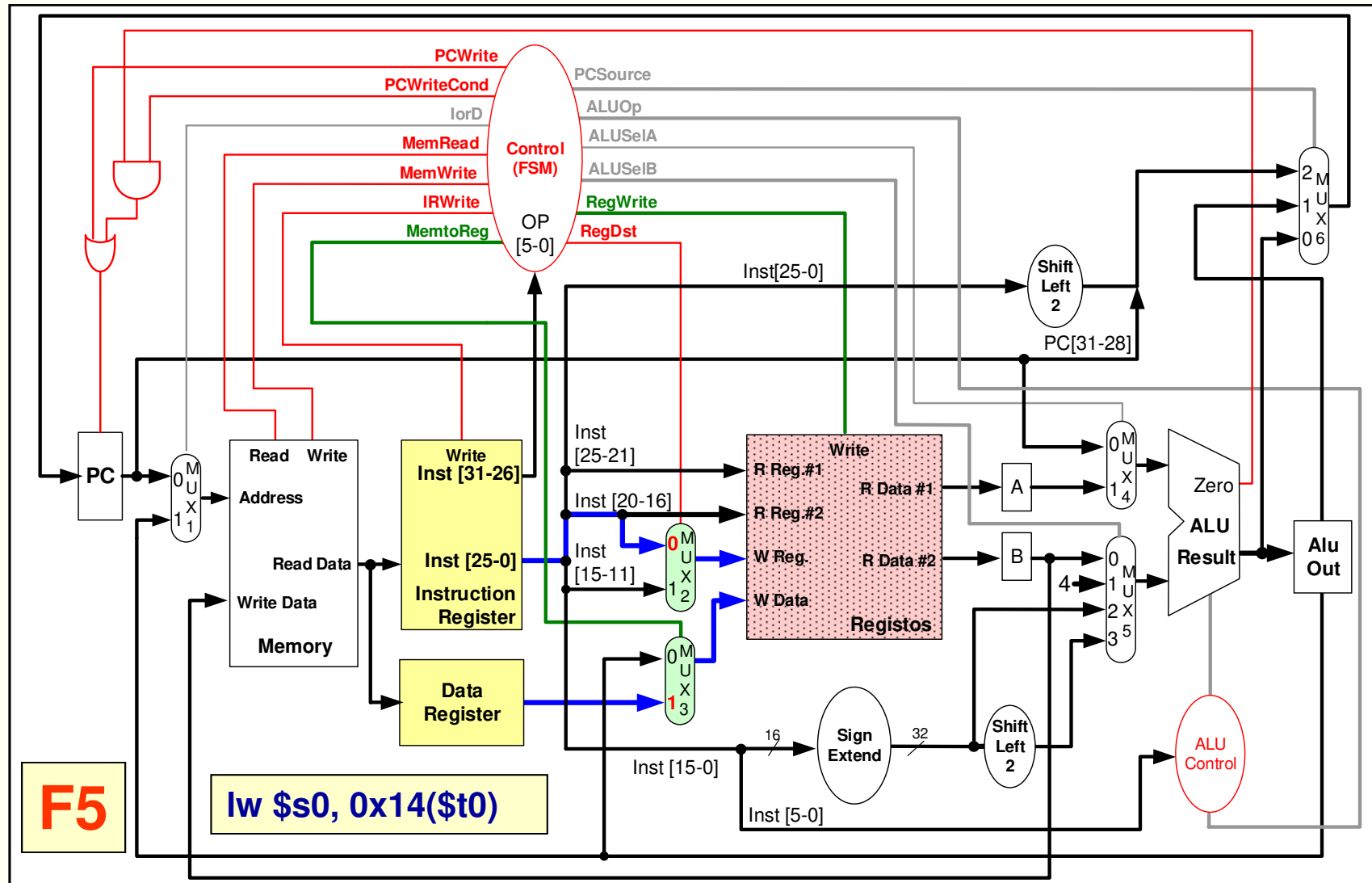
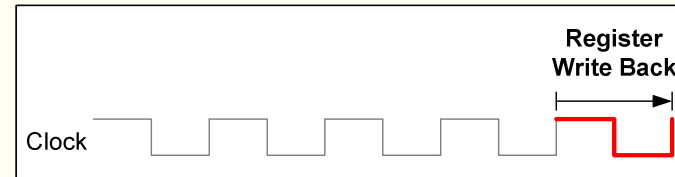
Instrução LW



Instrução LW



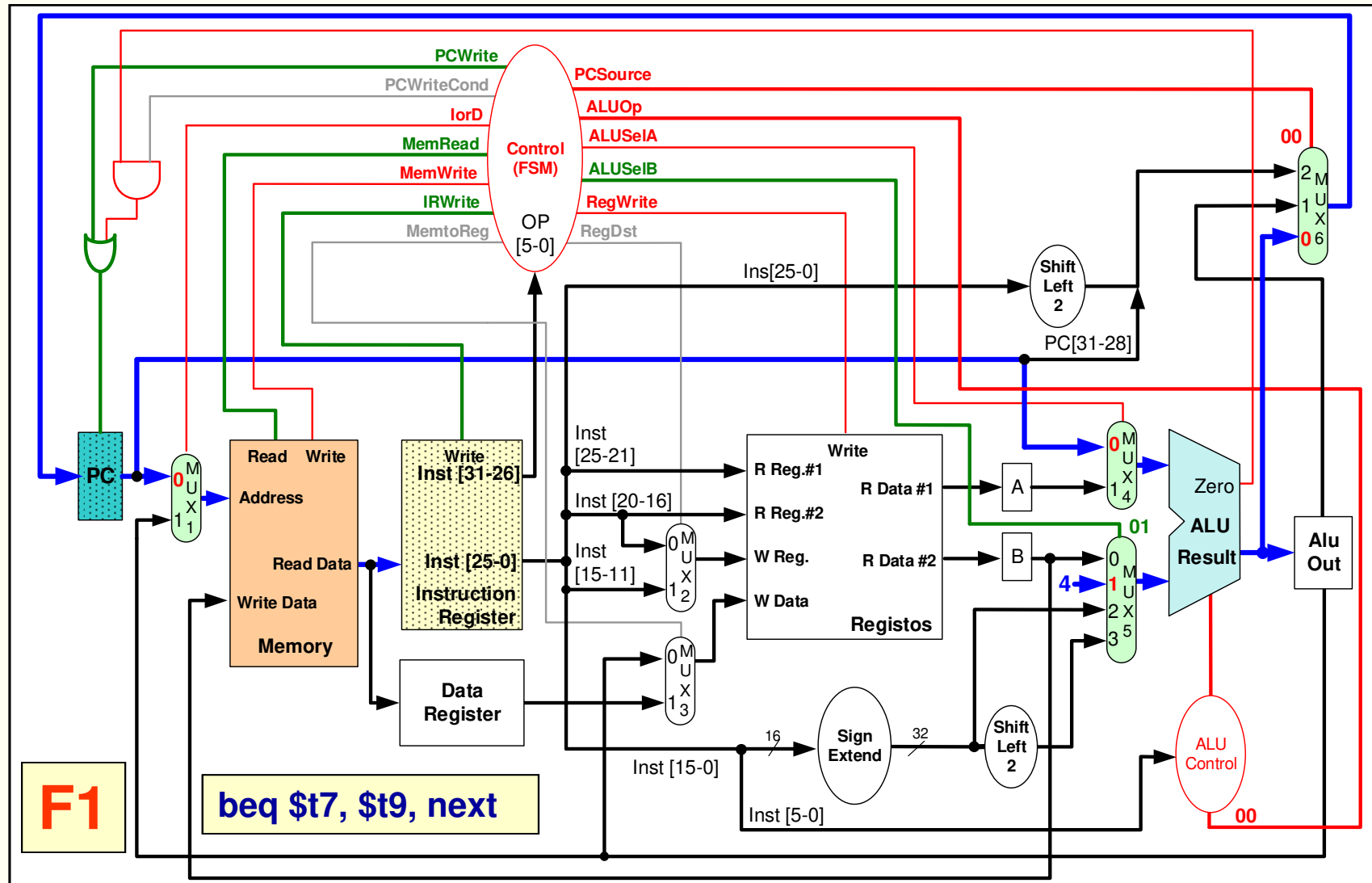
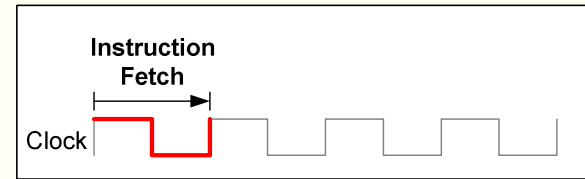
Instrução LW



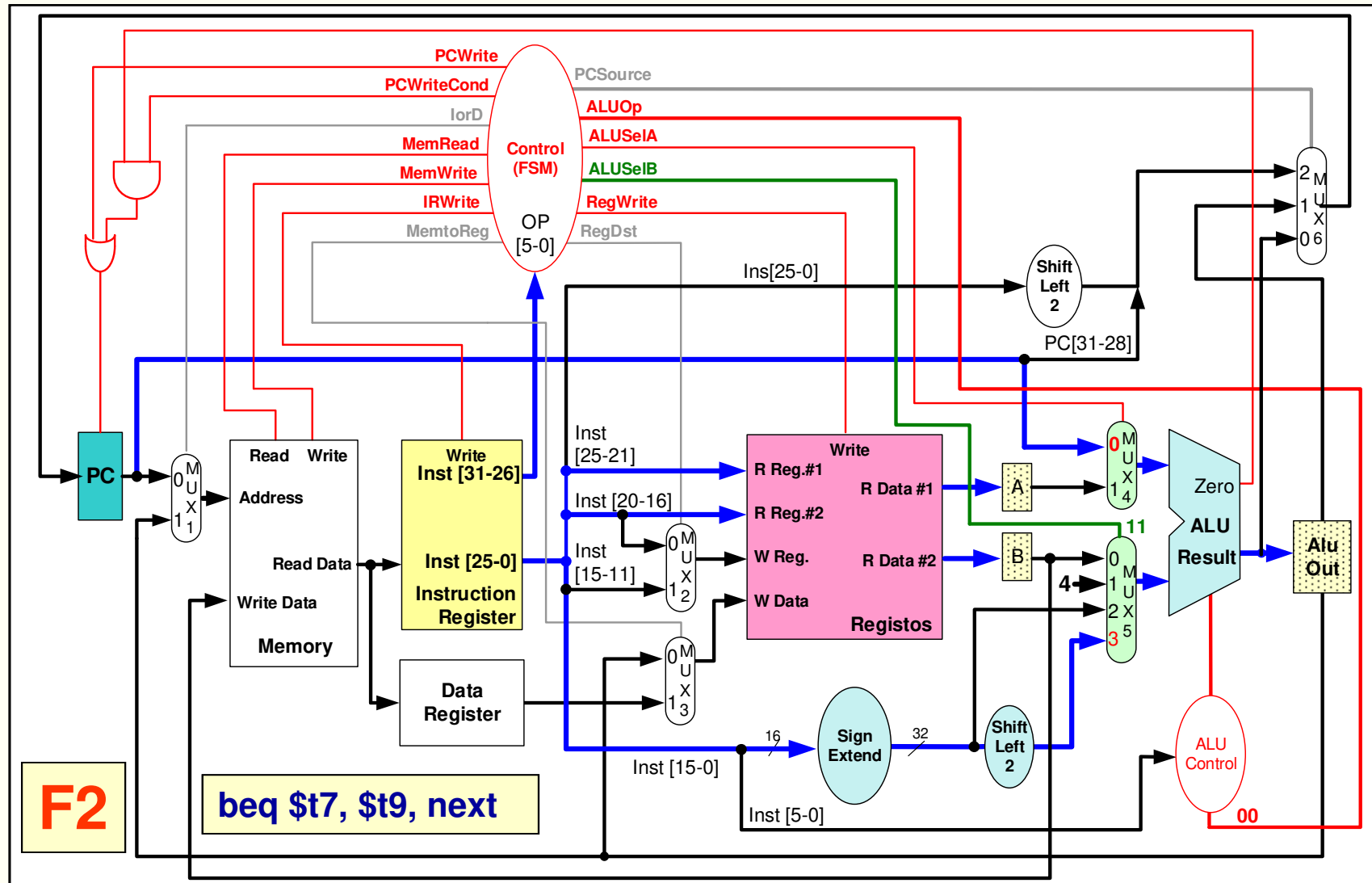
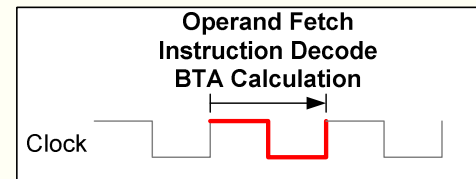
Funcionamento do *datapath* na instrução BEQ

- Fase 1:
 - *Instruction fetch*
 - Cálculo de PC+4
- Fase 2:
 - Leitura dos registos
 - Descodificação da instrução
 - Cálculo do endereço-alvo das instruções de *branch* (BTA)
- Fase 3:
 - Comparação dos dois registos na ALU (subtração)
 - Conclusão da instrução de *branch* com eventual escrita do registo PC com o BTA

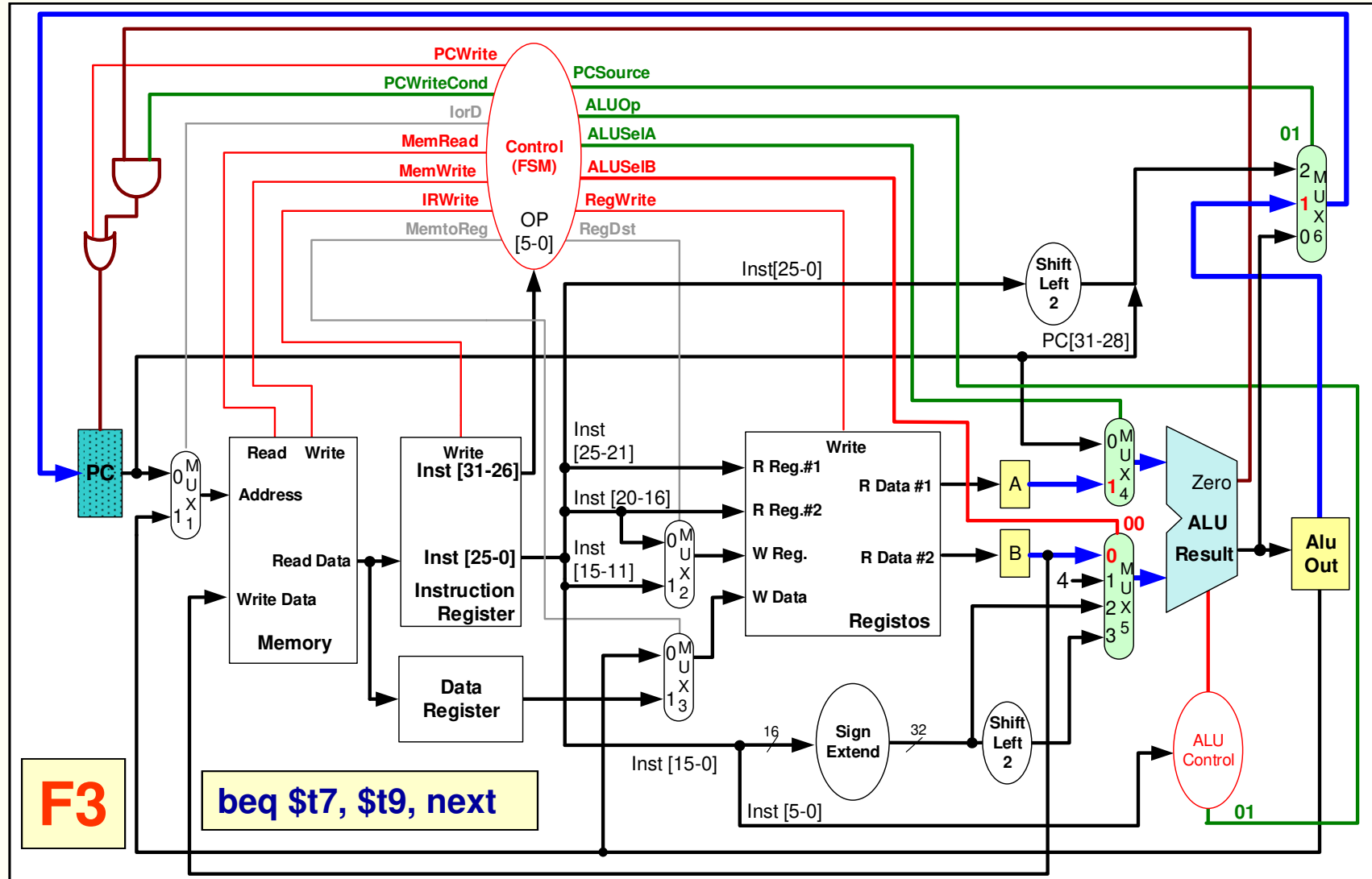
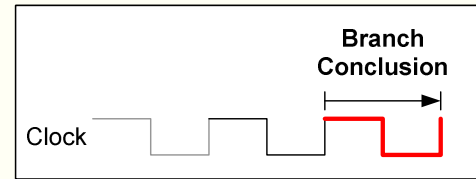
Instrução BEQ



Instrução BEQ



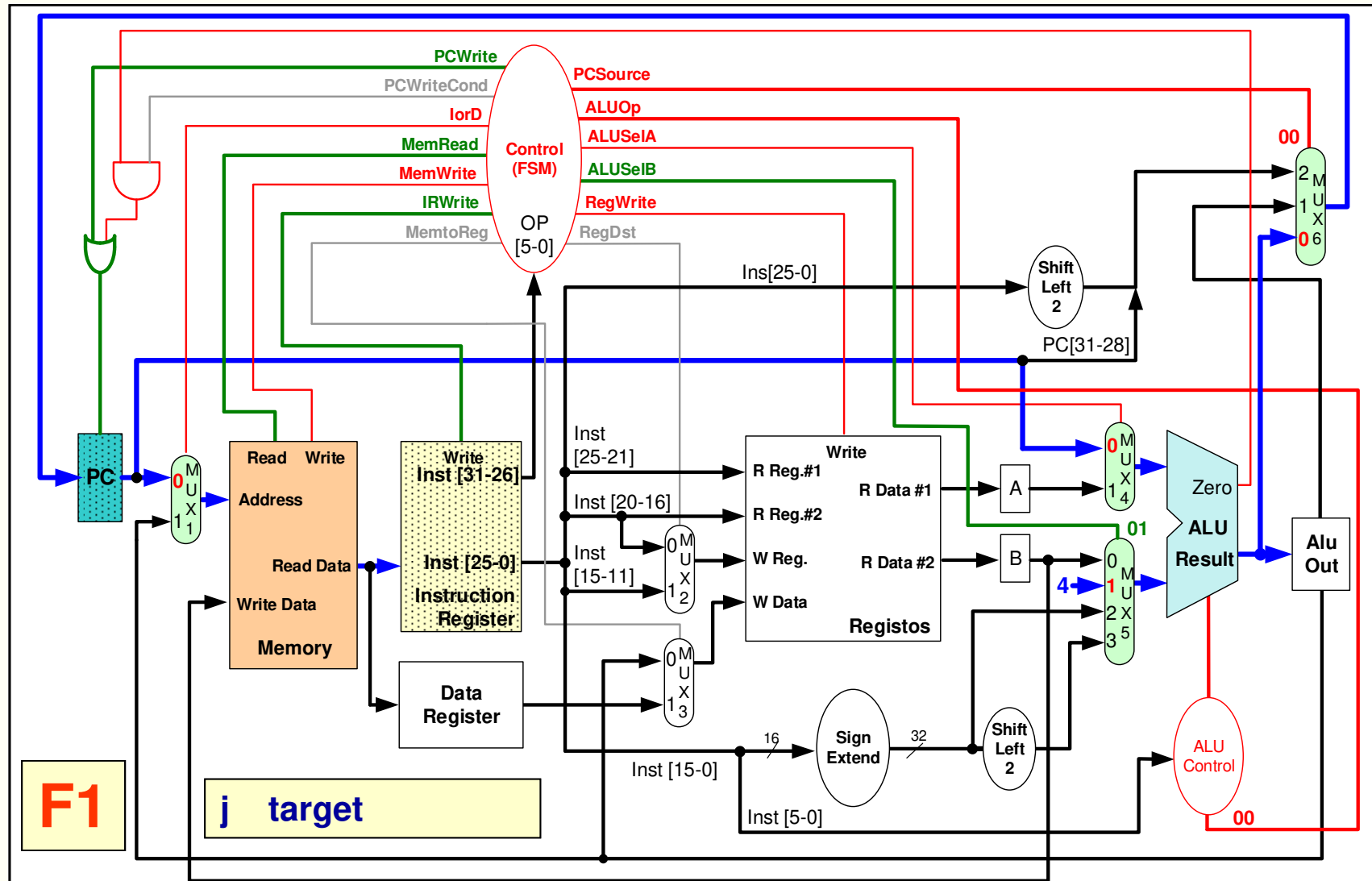
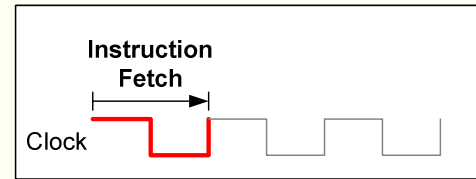
Instrução BEQ



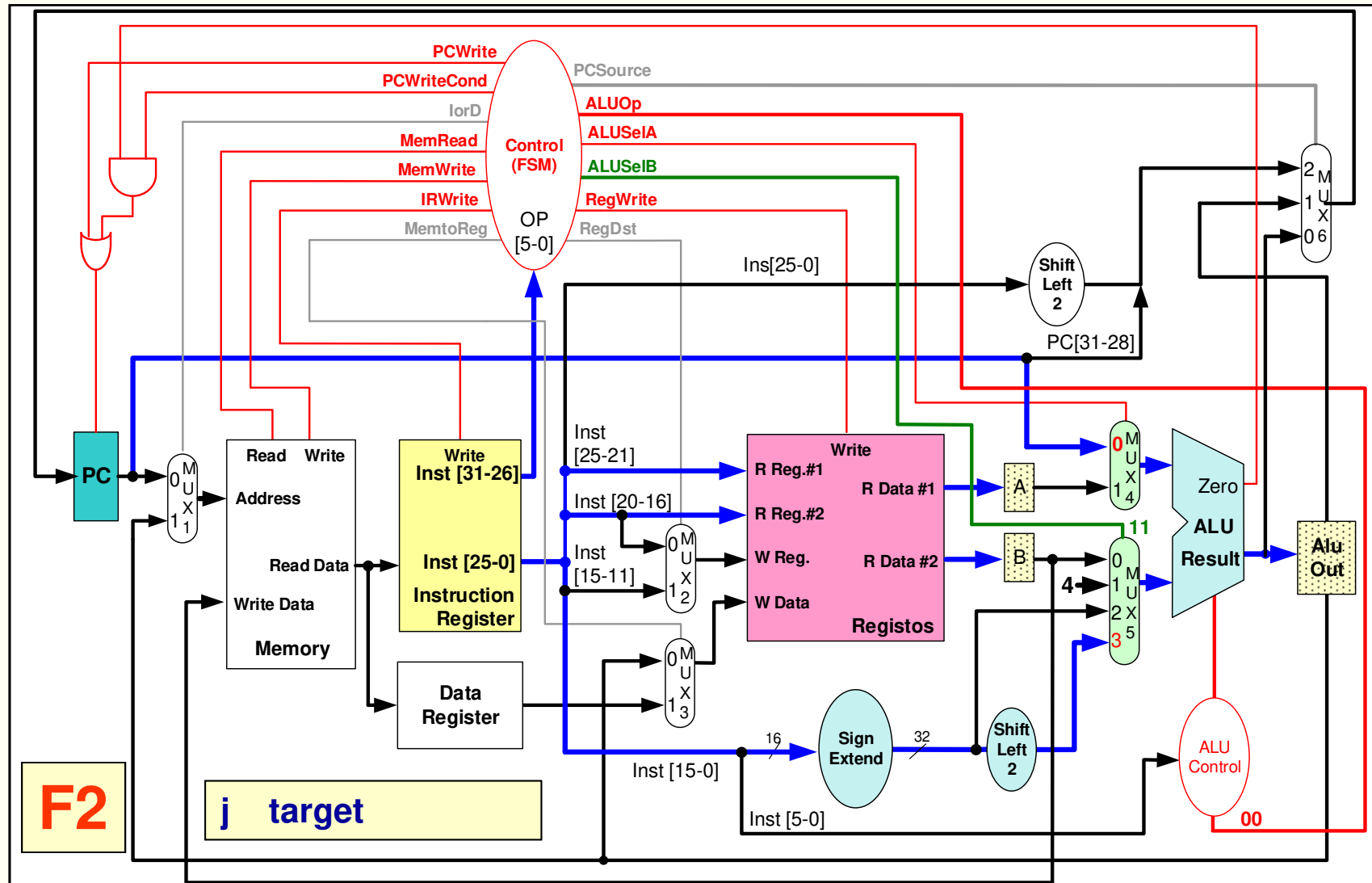
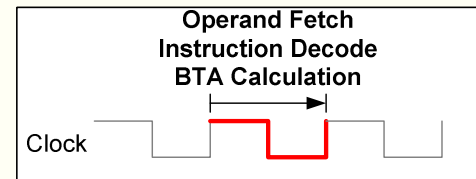
Funcionamento do *datapath* na instrução J

- Fase 1:
 - *Instruction fetch*
 - Cálculo de PC+4
- Fase 2:
 - Leitura dos registos
 - Descodificação da instrução
 - Cálculo do endereço-alvo das instruções de *branch*
- Fase 3:
 - Conclusão da instrução J com a seleção do JTA como próximo endereço do PC

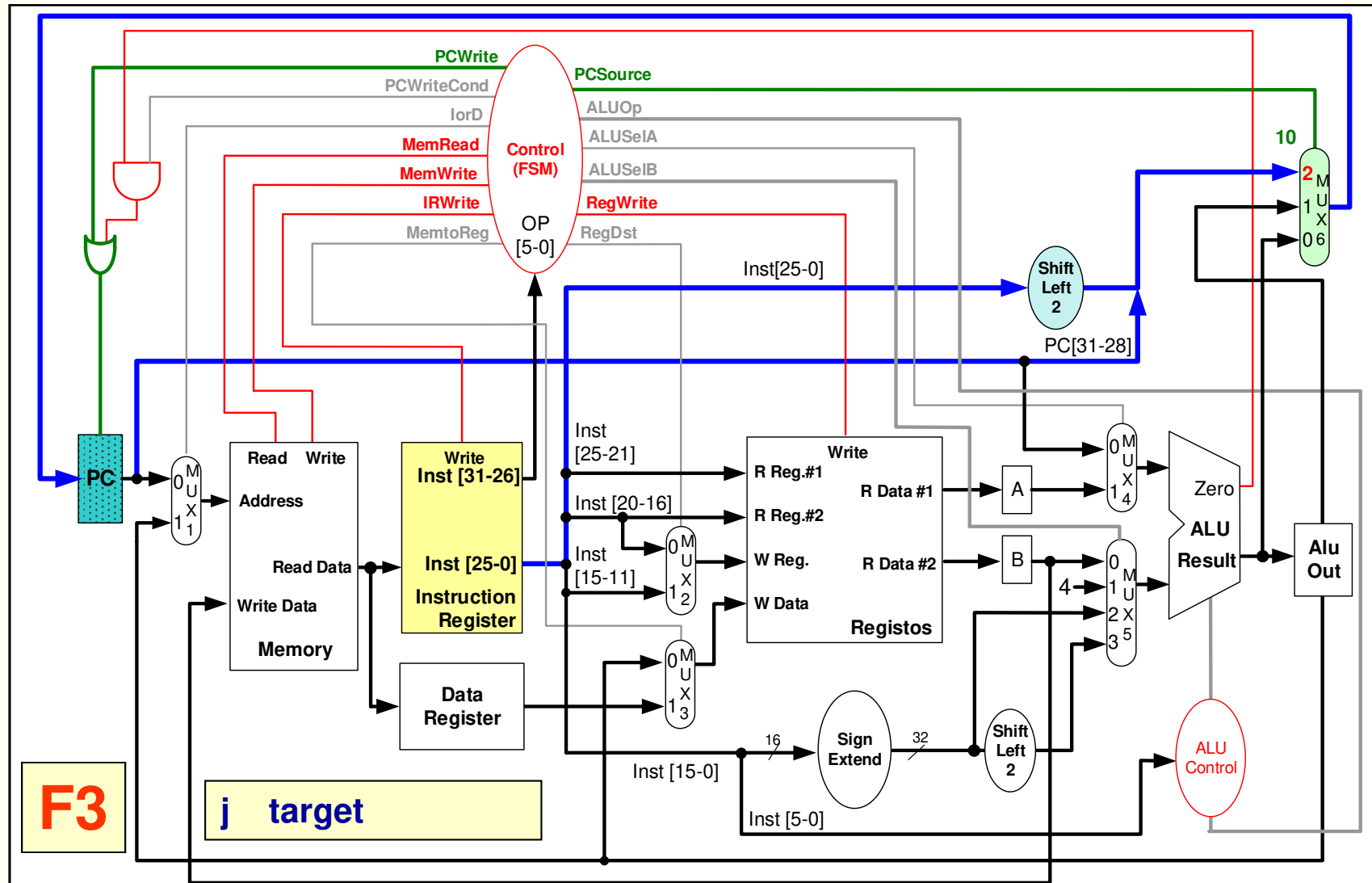
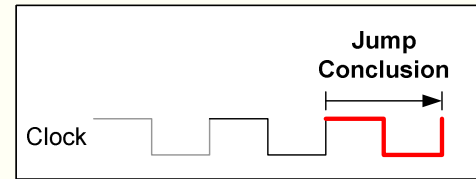
Instrução J



Instrução J



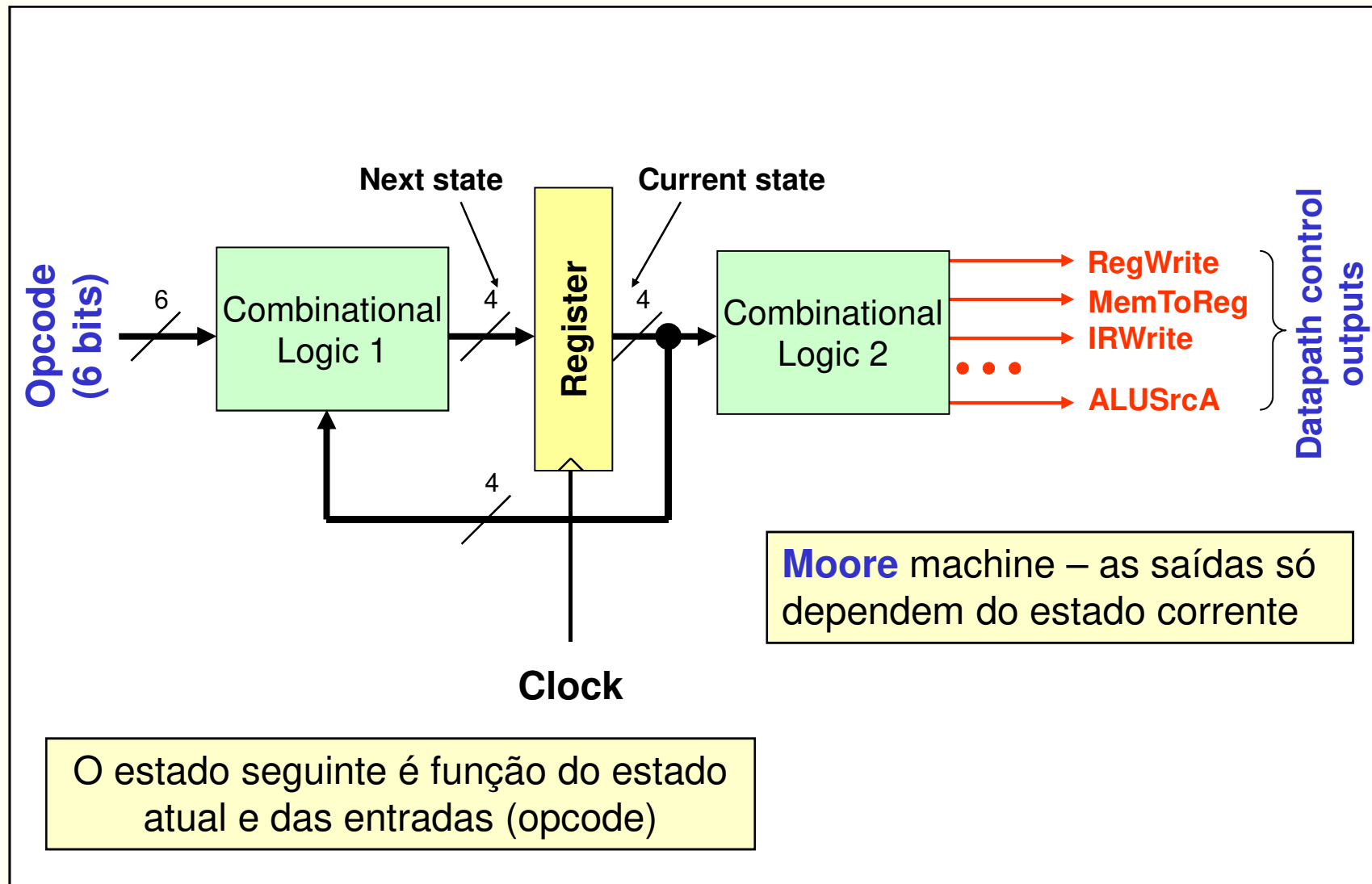
Instrução J



A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle*

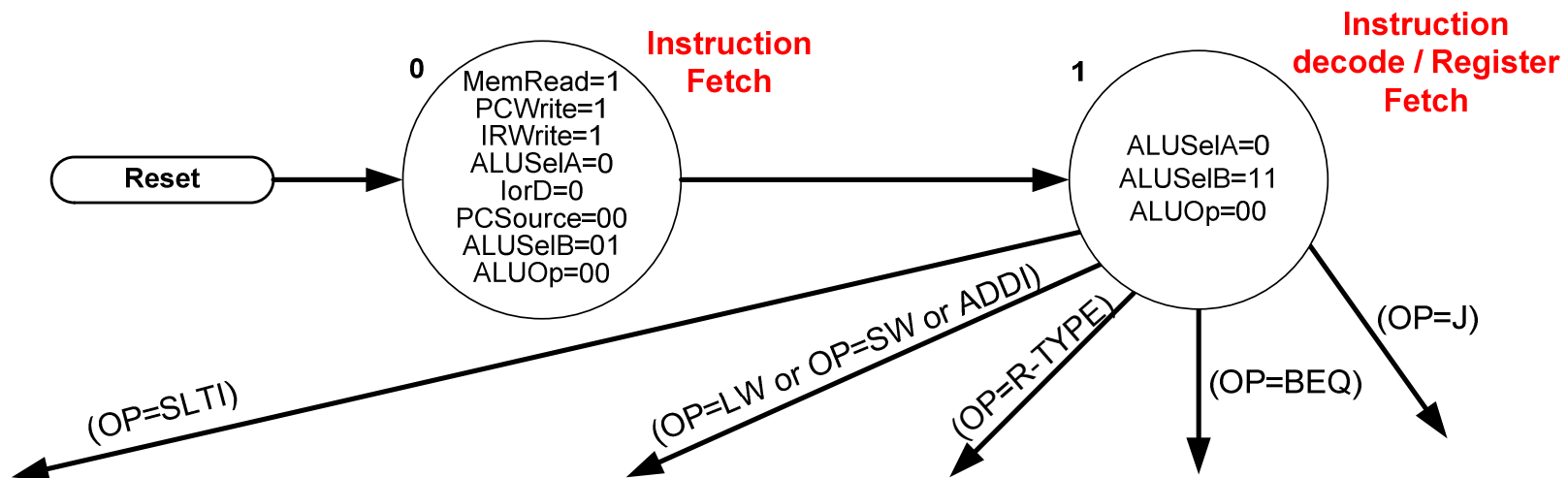
- No datapath **single-cycle**, cada instrução é executada num único ciclo de relógio:
 - a unidade de controlo é responsável pela geração de um conjunto de sinais que não se alteram durante a execução de cada instrução.
 - a relação entre os sinais de controlo e o código de operação pode assim ser gerado por um circuito meramente combinatório.
- No datapath **multi-cycle**, cada instrução é decomposta num conjunto de ciclos de execução, correspondendo cada um destes a um período de relógio distinto:
 - a geração dos sinais de controlo ao longo do conjunto de ciclos em que é decomposta cada instrução depende da instrução particular que está a ser executada.
 - a solução combinatória deixa portanto de poder ser utilizada neste caso, sendo necessário recorrer a uma máquina de estados.

A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle*



A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle*

- Os dois primeiros ciclos de instrução são comuns a todas as instruções
- Correspondem a dois estados únicos, sendo a transição entre ambos incondicional e independente de qualquer sinal de entrada

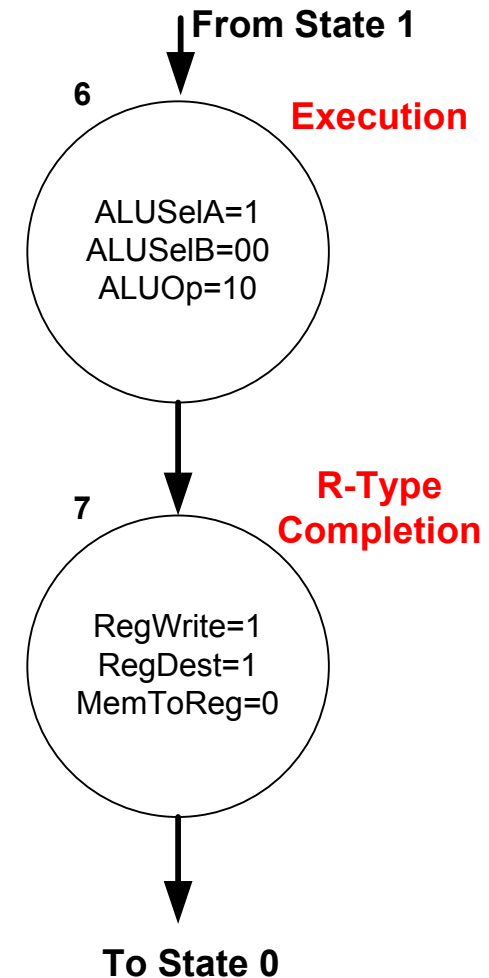


- O segundo estado tem cinco destinos distintos, dependendo do valor do campo OP da instrução

Nos diagramas apresentados os sinais de saída não explicitados em cada estado são irrelevantes (e.g. multiplexers) ou encontram-se no estado não ativo (controlo de elementos de estado).

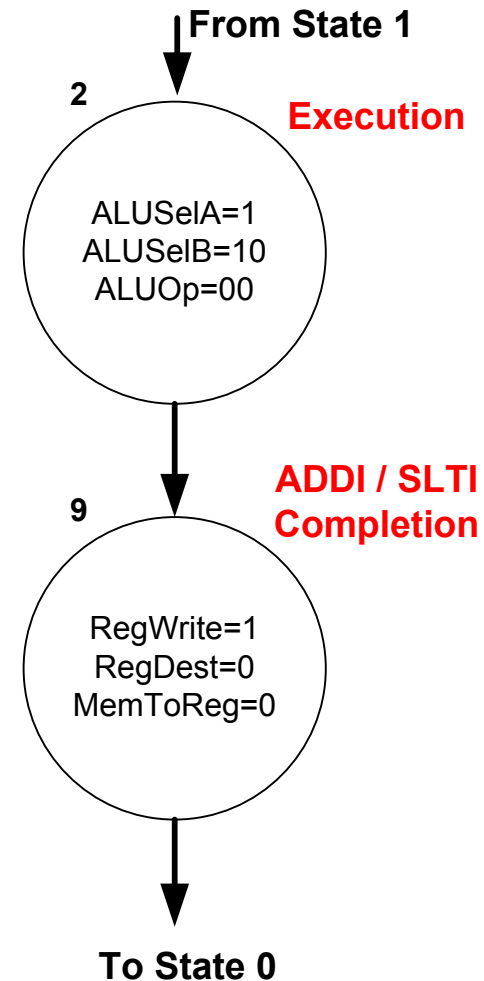
A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle*

- Nas **instruções do tipo "R"**, são necessários mais dois estados:
 - Um para controlar a execução da operação aritmética ou lógica e para assegurar o encaminhamento do 2º operando para a ALU
 - Outro para escrever o resultado no registo destino



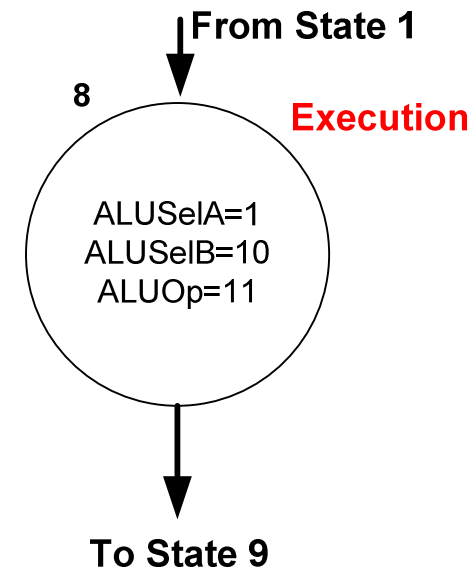
A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle*

- Na **instrução “ADDI”**, são necessários mais dois estados:
 - Um para definir a operação a realizar na ALU e para assegurar o encaminhamento do 2º operando para a ALU
 - Outro para escrever o resultado no registo destino



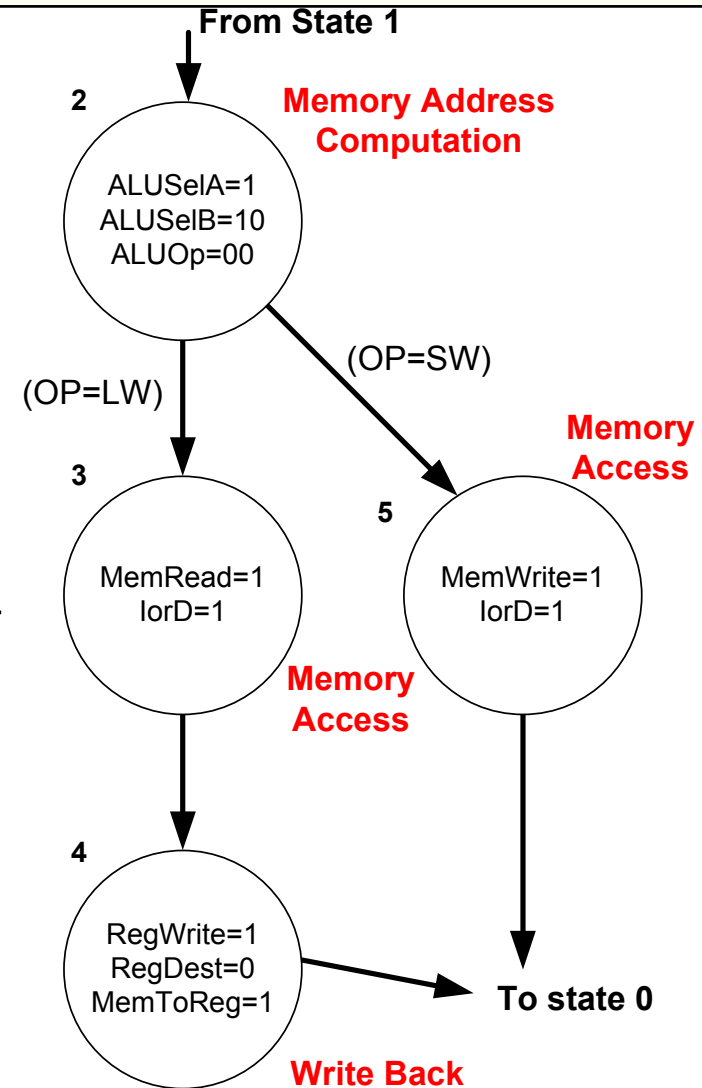
A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle*

- Para a **instrução “SLTI”**, é necessário mais um estado:
 - Para definir a operação a realizar na ALU e para assegurar o encaminhamento do 2º operando para a ALU
 - A conclusão desta instrução é igual à instrução “ADDI” (daí a partilha do estado 9)



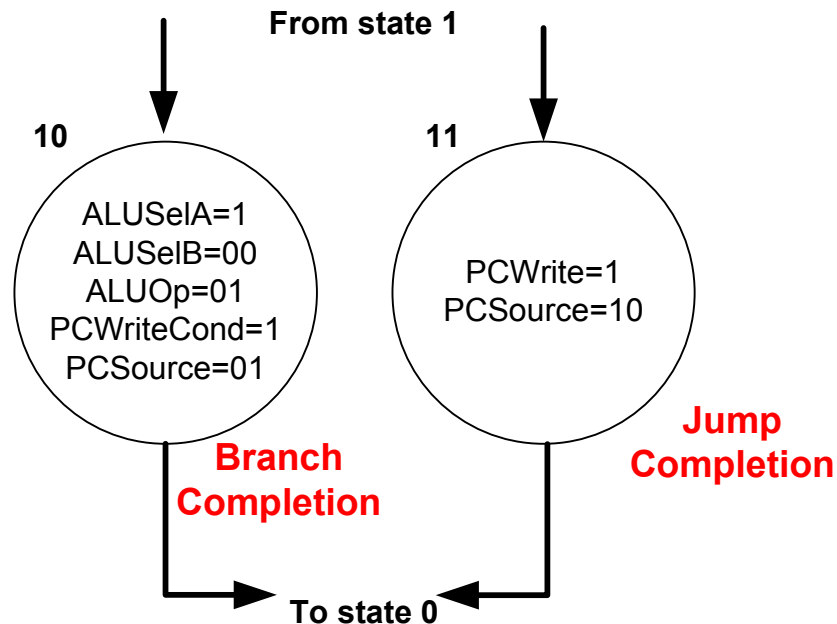
A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle*

- Nas **instruções de “load / store”**, o estado dois é dedicado a determinar o endereço da memória externa sobre a qual será efetuada a operação de escrita ou leitura
- A instrução de "load" obriga a um estado suplementar, face à instrução de "store", para permitir a escrita do valor lido no registo destino

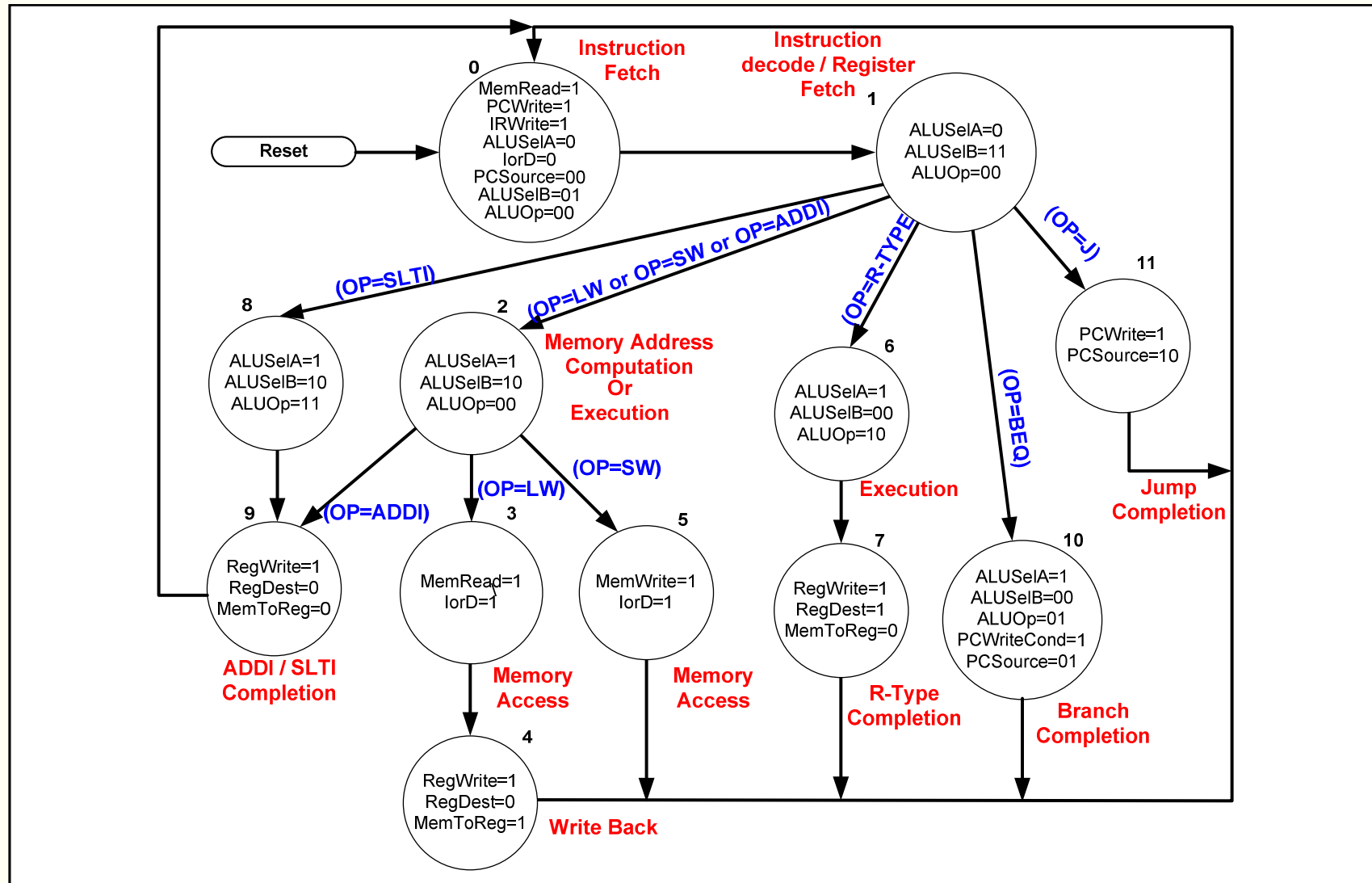


A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle*

- As **instruções de "branch"** condicional e as instruções de **"jump"**, finalmente, carecem apenas de mais um estado para poderem ser completadas



A unidade de controlo do *datapath* Multi-cycle



A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle*

- A unidade de controlo que acabamos de desenhar tem apenas 12 estados (4 variáveis de estado). A representação do seu aspeto funcional na forma de um diagrama de estados é portanto perfeitamente razoável
- Uma versão completa do *datapath* do MIPS (mais de cem instruções distintas) pode implicar ciclos de execução que variem entre dois e vinte períodos de relógio, complicando significativamente o diagrama de estados
- Em arquiteturas do Set de Instruções mais complexas, com um número muito superior de instruções agrupadas num número muito variado de classes, a unidade de controlo pode requerer milhares de estados agrupados em centenas de sequências distintas
- Nestes casos, o recurso a uma representação gráfica da máquina de estados é não só inadequada como virtualmente impossível de realizar. A **micro-programação** é uma forma alternativa de representar a unidade de controlo do ponto de vista funcional

A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle* - VHDL

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity ControlUnit is
  port( Clock      : in std_logic;
        Reset      : in std_logic;
        OpCode     : in std_logic_vector(5 downto 0);
        PCWrite    : out std_logic;
        IRWrite    : out std_logic;
        IorD       : out std_logic;
        PCSource   : out std_logic_vector(1 downto 0);
        RegDest    : out std_logic;
        PCWriteCond : out std_logic;
        MemRead    : out std_logic;
        MemWrite   : out std_logic;
        MemToReg   : out std_logic;
        ALUSelA    : out std_logic;
        ALUSelB    : out std_logic_vector(1 downto 0);
        RegWrite   : out std_logic;
        ALUOp      : out std_logic_vector(1 downto 0));
end ControlUnit;
```

A unidade de controlo do *datapath Multi-cycle* - VHDL

```
architecture Behavioral of ControlUnit is
    type TState is ( E0, E1, E2, E3, E4, E5, E6 , E7, E8, E9,
                     E10, E11);
    signal CS, NS : TState;
begin
    -- processo síncrono da máquina de estados (ME)
    process(Clock) is
    begin
        if(rising_edge(Clock)) then
            if(Reset = '1') then
                CS <= E0;
            else
                CS <= NS;
            end if;
        end if;
    end process;
    -- processo combinatório da ME na próxima página
end Behavioral;
```

```

process (CS, OpCode) is
begin
    PCWrite<= '0'; IRWrite <= '0'; IorD <= '0'; RegDest <= '0';
    PCWriteCond<= '0'; MemRead <= '0'; MemWrite <= '0'; MemToReg <= '0';
    RegWrite <= '0'; PCSource <= "00"; ALUOp <= "00"; ALUSelA <= '0';
    ALUSelB <= "00";
    NS <= CS;
    case CS is
        when E0 =>
            MemRead <= '1'; PCWrite <= '1'; IRWrite <= '1'; ALUSelB <= "01";
            NS <= E1;
        when E1 =>
            ALUSelB <= "11";
            if (OpCode = "000000") then NS <= E6;      -- R-Type instructions
            elsif (OpCode = "100011" or OpCode = "101011" or
                  OpCode = "001000") then           -- LW, SW, ADDI
                NS <= E2;
            elsif (OpCode = "001010") then NS <= E8; -- SLTI
            elsif (OpCode = "000100") then NS <= E10; -- BEQ
            elsif (OpCode = "000010") then NS <= E11; -- J
            end if;
        when E6 =>      -- R-Type instructions
            ALUSelA <= '1'; ALUOp <= "10";
            NS <= E7;
        when E7 =>      -- R-Type instructions
            RegWrite <= '1'; RegDest <= '1';
            NS <= E0;
        -- (...)
    end case;
end process;

```

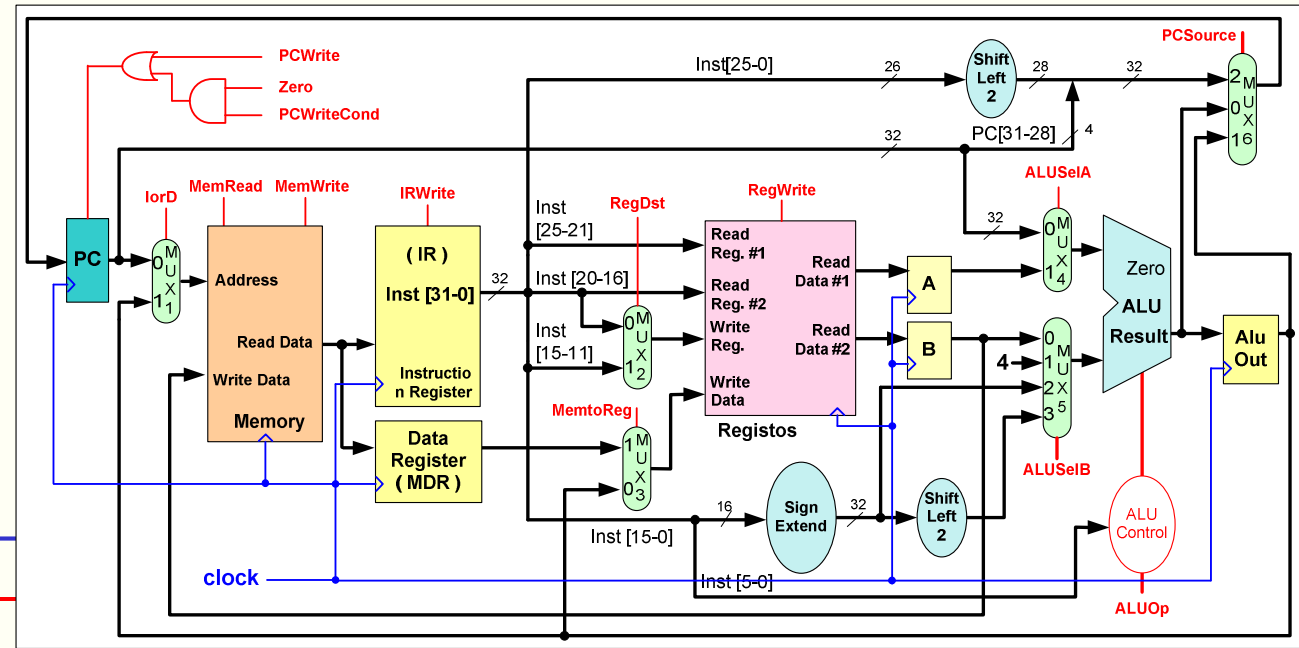
Processo combinatório

Funcionamento do DP

```
add    $2, $3, $4
sw     $2, -4($6)
or     $4, $6, $3
```

Sinais de controlo na execução sequencial das três instruções:

add \$2, \$3, \$4



PCWriteCond	0	X	0	0	0	X	0
PCWrite	0	1	0	0	0	1	0
MemWrite	0	0	0	0	1	0	0
MemRead	0	1	0	0	0	1	0
MemToReg	0	X	X	X	X	X	X
IRWrite	0	1	0	0	0	1	0
ALUSelA	X	0	0	1	X	0	0
ALUSelB	XX	01	11	10	XX	01	11
ALUOp	XX	00	00	00	XX	00	00
lorD	X	0	X	X	1	0	X
PCSource	XX	00	XX	XX	XX	00	XX
RegWrite	1	0	0	0	0	0	0
RegDst	1	X	X	X	X	X	X

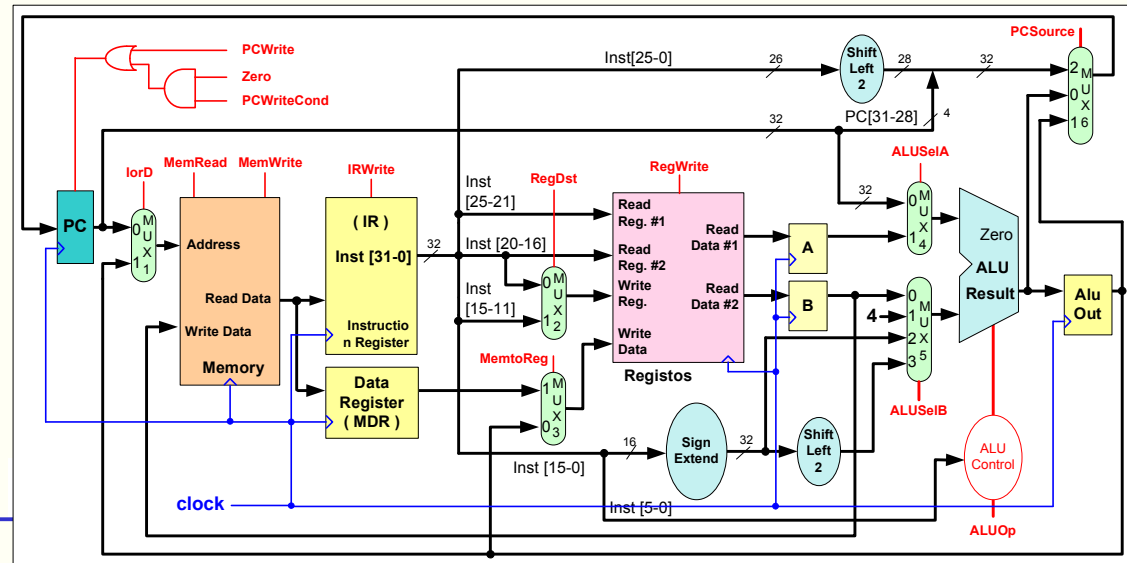
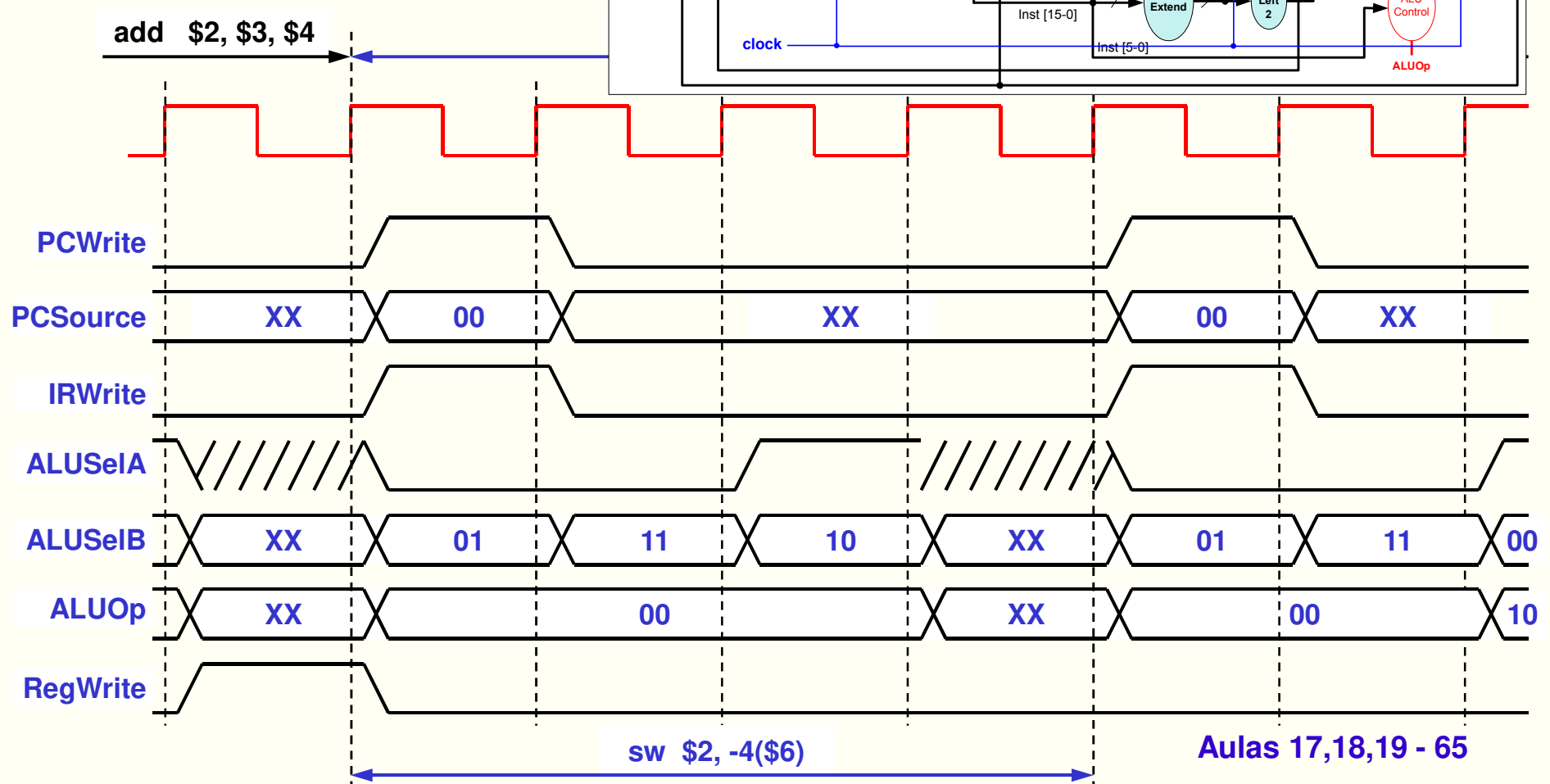
sw \$2, -4(\$6)

Aulas 17,18,19 - 64

Funcionamento do DP

```
add    $2, $3, $4
sw     $2, -4($6)
or     $4, $6, $3
```

Sinais de controlo: diagrama temporal

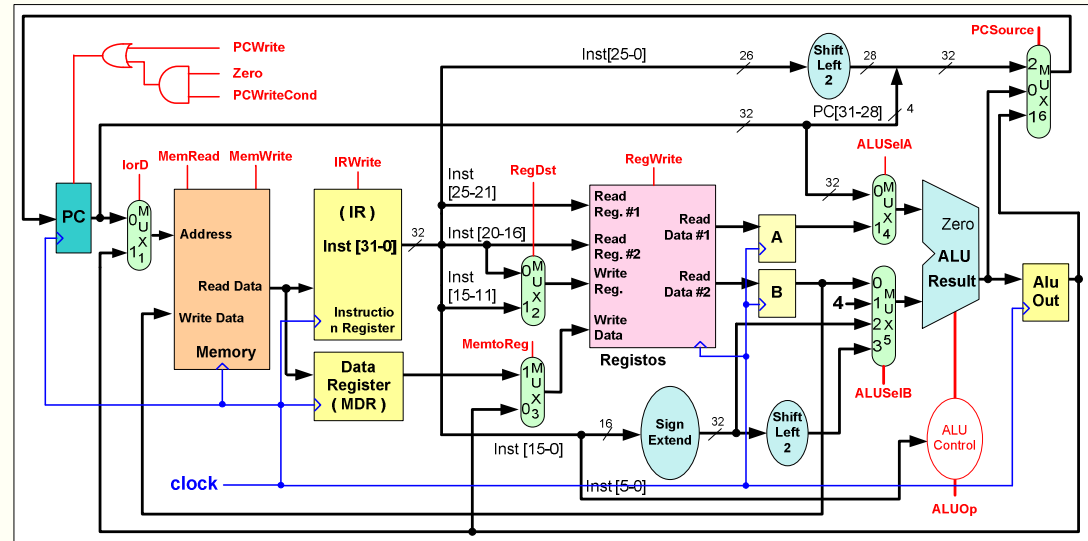


Funcionamento do DP

00400048 add \$2, \$3, \$4 # 00641020
 0040004C sw \$2, -4(\$6) # ACC2FFFC
 00400050 or \$4, \$6, \$3 # 00C32025

Valores calculados /
 obtidos em cada ciclo
 de relógio:

\$3	20001FA6
\$4	81002378
\$6	10012480



	add \$2, \$3, \$4		sw \$2, -4(\$6)			or \$4, \$6, \$3	
PC	0040004C	0040004C	00400050	00400050	00400050	00400050	00400054
IR	00641020	00641020	ACC2FFFC	ACC2FFFC	ACC2FFFC	ACC2FFFC	00C32025
MDR	?	?	ACC2FFFC	?	?	?	00C32025
ALU Res	?	00400050	00400040	1001247C	?	00400054	004080E8
ALU Out	A100431E	?	00400050	00400040	1001247C	?	00400054
ALU Zero	?	0	0	0	?	0	0
A	20001FA6	20001FA6	20001FA6	10012480	10012480	10012480	10012480
B	81002378	81002378	81002378	A100431E	A100431E	A100431E	A100431E
ALUOp	XX	00	00	00	XX	00	00

Opcodes: **SW** - 0x2B, **ADD** - 0x20, **OR** - 0x25

Aulas 17,18,19 - 66

Exercício

- Calcule o número de ciclos de relógio que o programa seguinte demora a executar, desde o *Instruction Fetch* da 1ª instrução até à conclusão da última instrução:

1) num *datapath single-cycle*, 2) num *datapath multi-cycle*

main:

lw \$1, 0 (\$0)

add \$4, \$0, \$0

lw \$2, 4 (\$0)

loop:

lw \$3, 0 (\$1)

add \$4, \$4, \$3

sw \$4, 36 (\$1)

addiu \$1, \$1, 4

sltu \$5, \$1, \$2

bne \$5, \$0, loop

sw \$4, 8 (\$0)

lw \$1, 12 (\$0)

Memória de dados

Address	Value
---------	-------

0x00000000	0x10
------------	------

0x00000004	0x20
------------	------

Exercício

- Calcule o número de ciclos de relógio que o programa seguinte demora a executar, desde o *Instruction Fetch* da 1ª instrução até à conclusão da última instrução:

1) num *datapath single-cycle*, 2) num *datapath multi-cycle*

```
main:                                # p0 = 0;
    lw    $1, 0($0)                  # p1 = *p0 = 0x10;
    add   $4, $0, $0                 # v = 0;
    lw    $2, 4($0)                  # p2 = *(p0+1) = 0x20;
loop:                                # do {
    lw    $3, 0($1)                  #     aux1 = *p1;
    add   $4, $4, $3                 #     v = v + *p1;
    sw    $4, 36($1)                 #     *(p1 + 9) = v;
    addiu $1, $1, 4                  #     p1++;
    sltu  $5, $1, $2                 #
    bne   $5, $0, loop               # } while(p1 < p2);
    sw    $4, 8($0)                  # *(p0 + 2) = v;
    lw    $1, 12($0)                 # aux2 = *(p0 + 3);
```

Memória de dados

Address	Value
---------	-------

0x00000000	0x10
------------	------

0x00000004	0x20
------------	------