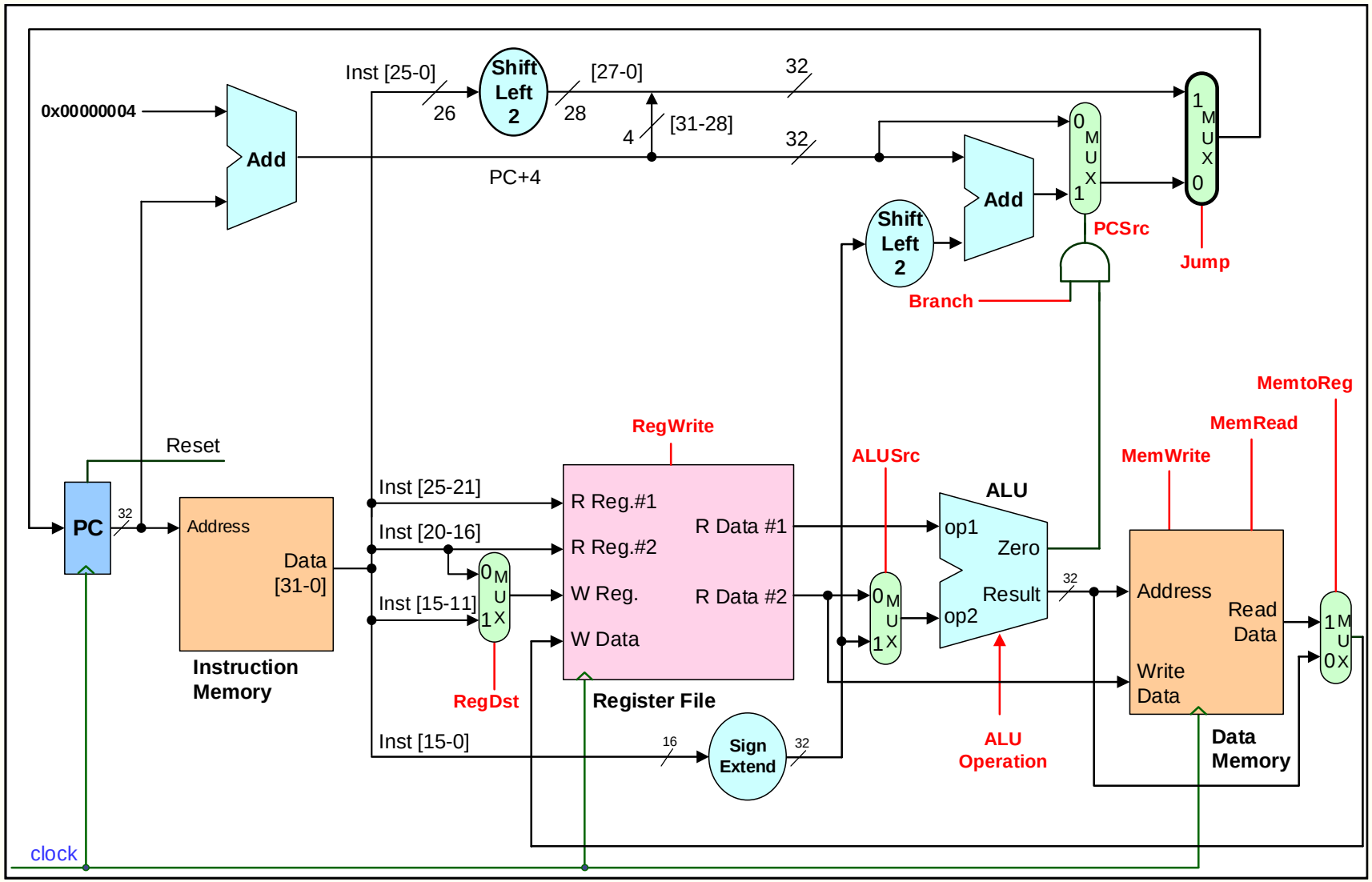
Aulas 15 e 16

- A unidade de controlo principal do *datapath single-cycle*
- A unidade de controlo da ALU
- Desenho das unidades de controlo do *datapath* e da ALU
- Exemplos de funcionamento do *datapath* com unidade de controlo

Bernardo Cunha, José Luís Azevedo, Arnaldo Oliveira

Datapath single-cycle completo

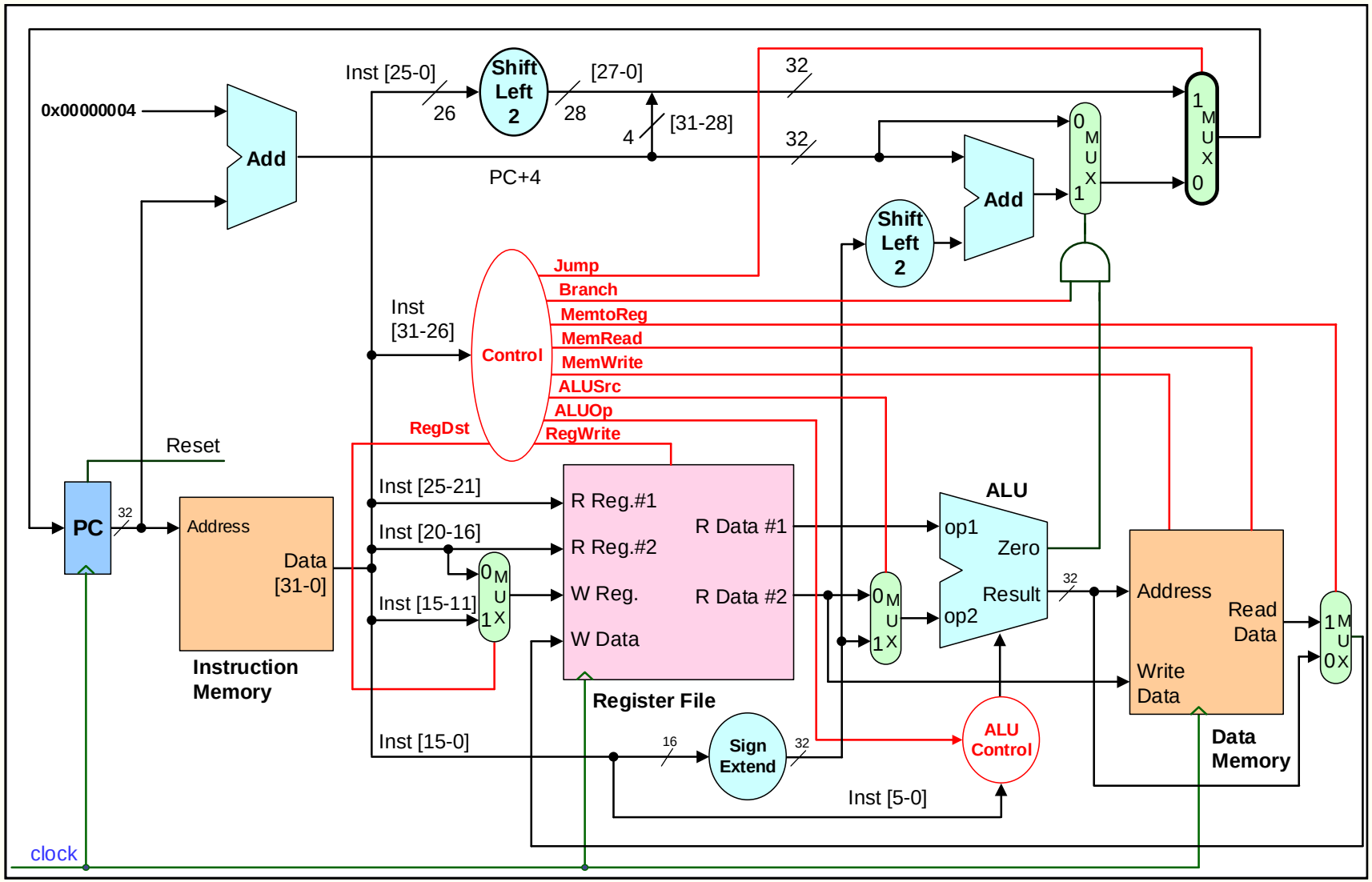


Datapath – unidade de controlo

- A unidade de controlo deve gerar os sinais (identificados a vermelho) para:
  - 1) controlar a escrita e/ou a leitura em elementos de estado: banco de registos e memória de dados
  - 2) definir a operação dos elementos combinatórios: ALU e *multiplexers*

- A operação da ALU é definida por uma unidade de controlo específica (ALU Control), em conjunto com a unidade de controlo principal

Datapath – unidade de controlo



Datapath – unidade de controlo

- Alguns dos elementos de estado do *datapath* são acedidos em todos os ciclos de relógio (PC e memória de instruções)
  - Nestes casos não há necessidade de explicitar um sinal de controlo
- Outros elementos de estado podem ser lidos ou escritos dependendo da instrução que estiver a ser executada (memória de dados e banco de registos)
  - Para estes é necessário explicitar os respetivos sinais de controlo
- Nos elementos de estado, a **escrita** é sempre realizada de forma síncrona; a **leitura** é sempre realizada de forma assíncrona

Unidade de controlo da ALU

- As instruções básicas que fazem uso da ALU são:
  - **Load e store** – para calcular o endereço da memória externa
  - **Branch if equal / not equal** – para determinar se os operandos são iguais ou diferentes
  - **Aritméticas e lógicas** – para efetuar a respetiva operação
- A operação a realizar na ALU depende:
  - dos campos **opcode** e **funct** nas instruções aritméticas e lógicas de tipo R: **ALUControl = f(opcode, funct)**
  - do campo **opcode** nas restantes instruções: **ALUControl = f(opcode)**
- Assim, a geração dos sinais de controlo da ALU pode ser realizada em dois níveis:
  - Nível 1: **ALUOp = g (opcode)**
  - Nível 2: **ALUControl = f (ALUOp, funct)**

Unidade de controlo da ALU

- A relação entre o tipo de instruções, o campo "**`funct`**", a operação efetuada pela ALU e os sinais de controlo da mesma, pode ser resumida pela seguinte tabela

ALU Control	ALU Action
0 0 0	And
0 0 1	Or
0 1 0	Add
1 1 0	Subtract
1 1 1	Set if Less Than

Instruction	OpCode	Funct	ALU Action	ALUOp	ALU Control
load word	100011 ("lw")	xxxxxx	**add**	**00**	**010**
store word	101011 ("sw")	xxxxxx	**add**	**00**	**010**
addi	001000 ("addi")	xxxxxx	**add**	**00**	**010**
branch if equal	000100 ("beq")	xxxxxx	**subtract**	**01**	**110**
add	000000 (R-Type)	100000	**add**	**10**	**010**
subtract	000000 (R-Type)	100010	**subtract**	**10**	**110**
and	000000 (R-Type)	100100	**and**	**10**	**000**
or	000000 (R-Type)	100101	**or**	**10**	**001**
set if less than	000000 (R-Type)	101010	**set if less than**	**10**	**111**
set if less than imm	001010 ("slti")	xxxxxx	**set if less than**	**11**	**111**
jump	000010 ("j")	xxxxxx	**-**	**xx**	**xxx**

Unidade de controlo da ALU

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

entity ALUControlUnit is
 port(ALUop      : in  std_logic_vector(1 downto 0);
      funct      : in  std_logic_vector(5 downto 0);
      ALUcontrol : out std_logic_vector(2 downto 0));
end ALUControlUnit;
```

Unidade de controlo da ALU

```
architecture Behavioral of ALUControlUnit is
begin
  process(ALUop, funct)
  begin
      case ALUop is
          when "00" => -- LW, SW, ADDI
              ALUcontrol <= "010";
          when "01" => -- BEQ
              ALUcontrol <= "110";
          when "10" => -- R-Type instructions
              case funct is
                  when "100000" => ALUcontrol <= "010";    -- ADD
                  when "100010" => ALUcontrol <= "110";    -- SUB
                  when "100100" => ALUcontrol <= "000";    -- AND
                  when "100101" => ALUcontrol <= "001";    -- OR
                  when "101010" => ALUcontrol <= "111";    -- SLT
                  when others   => ALUcontrol <= "010";
              end case;
          when "11" => -- SLTI
              ALUcontrol <= "111";
      end case;
  end process;
end Behavioral;
```

ALU Control	ALU Action
0 0 0	And
0 0 1	Or
0 1 0	Add
1 1 0	Subtract
1 1 1	Set if Less Than

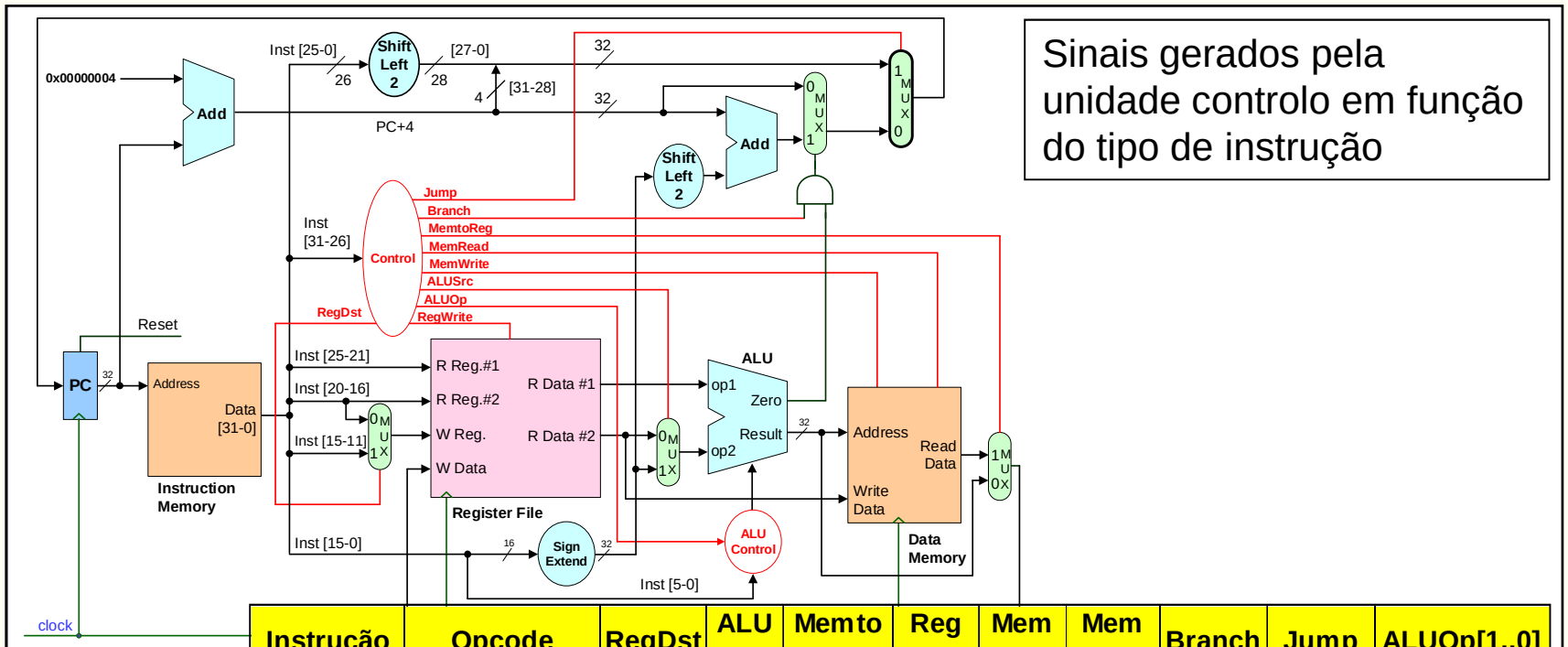
ALUOp	ALU Action
00	Add
01	Subtract
10	R-Type
11	Set if Less Than

Unidade de controlo principal

- É necessário especificar um total de oito (+1) sinais de controlo (para além do ALUOp):

Sinal	Efeito quando não ativo ('0')	Efeito quando ativo ('1')
MemRead	Nenhum	O conteúdo da memória de dados no endereço indicado é apresentado à saída
MemWrite	Nenhum	O conteúdo do registo de memória de dados cujo endereço é fornecido é substituido pelo valor apresentado à entrada
ALUSrc	O segundo operando da ALU provém da segunda saída do *File Register*	O segundo operando da ALU provém dos 16 bits menos significativos da instrução após extensão do sinal
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 dos registos internos provém da memória externa
PCSrc	O PC é substituido pelo seu valor actual mais 4	O PC é substituido pelo resultado do somador que calcula o endereço target do *branch* condicional
Branch	Nenhum	Indica que a instrução é um branch condicional
Jump	Nenhum	Indica que a instrução é um *jump* incondicional

Unidade de controlo principal



Sinais gerados pela unidade controlo em função do tipo de instrução

Instrução	Opcode	RegDst	ALU Src	Memto Reg	Reg Write	Mem Read	Mem Write	Branch	Jump	ALUOp[1..0]
R - Format	000000 (0x00)	1	0	0	1	0	0	0	0	10
lw	100011 (0x23)	0	1	1	1	1	0	0	0	00
sw	101011 (0x2B)	X	1	X	0	0	1	0	0	00
addi	001000 (0x08)	0	1	0	1	0	0	0	0	00
beq	000100 (0x04)	X	0	X	0	0	0	1	0	01
slti	001010 (0x0A)	0	1	0	1	0	0	0	0	11
j	000010 (0x02)	X	X	X	0	0	0	X	1	XX

Unidade de controlo principal

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

entity ControlUnit is
 port(OpCode   : in std_logic_vector(5 downto 0);
      RegDst   : out std_logic;
      Branch   : out std_logic;
      Jump     : out std_logic;
      MemRead  : out std_logic;
      MemWrite : out std_logic;
      MemToReg : out std_logic;
      ALUsrc   : out std_logic;
      RegWrite : out std_logic;
      ALUop    : out std_logic_vector(1 downto 0));
end ControlUnit;
```

```
architecture Behavioral of ControlUnit is
begin
  process(OpCode)
  begin
      RegDst   <= '0'; Branch   <= '0'; MemRead  <= '0'; MemWrite <= '0';
      MemToReg <= '0'; ALUsrc   <= '0'; RegWrite <= '0'; Jump <= '0';
      ALUop    <= "00";
      case OpCode is
          when "000000" =>  -- R-Type instructions
              ALUop  <= "10"; RegDst <= '1'; RegWrite    <= '1';
          when "000100" =>  -- BEQ
              ALUop  <= "01"; Branch <= '1';
          when "100011" =>  -- LW
              ALUsrc <= '1'; MemToReg <= '1'; MemRead <= '1'; RegWrite <= '1';
          when "101011" =>  -- SW
              ALUsrc <= '1'; MemWrite <= '1';
          when "001000" =>  -- ADDI
              ALUsrc <= '1'; RegWrite <= '1';
          when "001010" =>  -- SLTI
              ALUop  <= "11"; ALUsrc    <= '1'; RegWrite <= '1';
          when "000010" =>  -- J
              Jump   <= '1';
          when others =>
      end case;
  end process;
end Behavioral;
```

Instrução	Opcode	RegDst	ALU Src	Memto Reg	Reg Write	Mem Read	Mem Write	Branch	Jump	ALUOp[1..0]
R - Format	000000 (0x00)	1	0	0	1	0	0	0	0	10
lw	100011 (0x23)	0	1	1	1	1	0	0	0	00
sw	101011 (0x2B)	X	1	X	0	0	1	0	0	00
addi	001000 (0x08)	0	1	0	1	0	0	0	0	00
beq	000100 (0x04)	X	0	X	0	0	0	1	0	01
slti	001010 (0x0A)	0	1	0	1	0	0	0	0	11
j	000010 (0x02)	X	X	X	0	0	0	X	1	XX

Análise do funcionamento do *datapath*

- A execução de qualquer uma das instruções suportadas ocorre no intervalo de tempo correspondente a um único ciclo de relógio: tem início numa transição ativa do relógio e termina na transição ativa seguinte
- Para simplificar a análise podemos, no entanto, admitir que a utilização dos vários elementos operativos é “sequencial” e decorre ao longo de um conjunto de operações que culminam com:
  - escrita no Banco de Registos: instruções tipo R, LW, ADDI, SLTI
  - escrita na Memória de Dados: SW
- O *Program Counter* é sempre atualizado com:
  - endereço-alvo da instrução BEQ, se os registos forem iguais (*branch taken*), ou PC+4 se forem diferentes (*branch not taken*)
  - endereço-alvo da instrução J
  - PC+4 nas restantes instruções

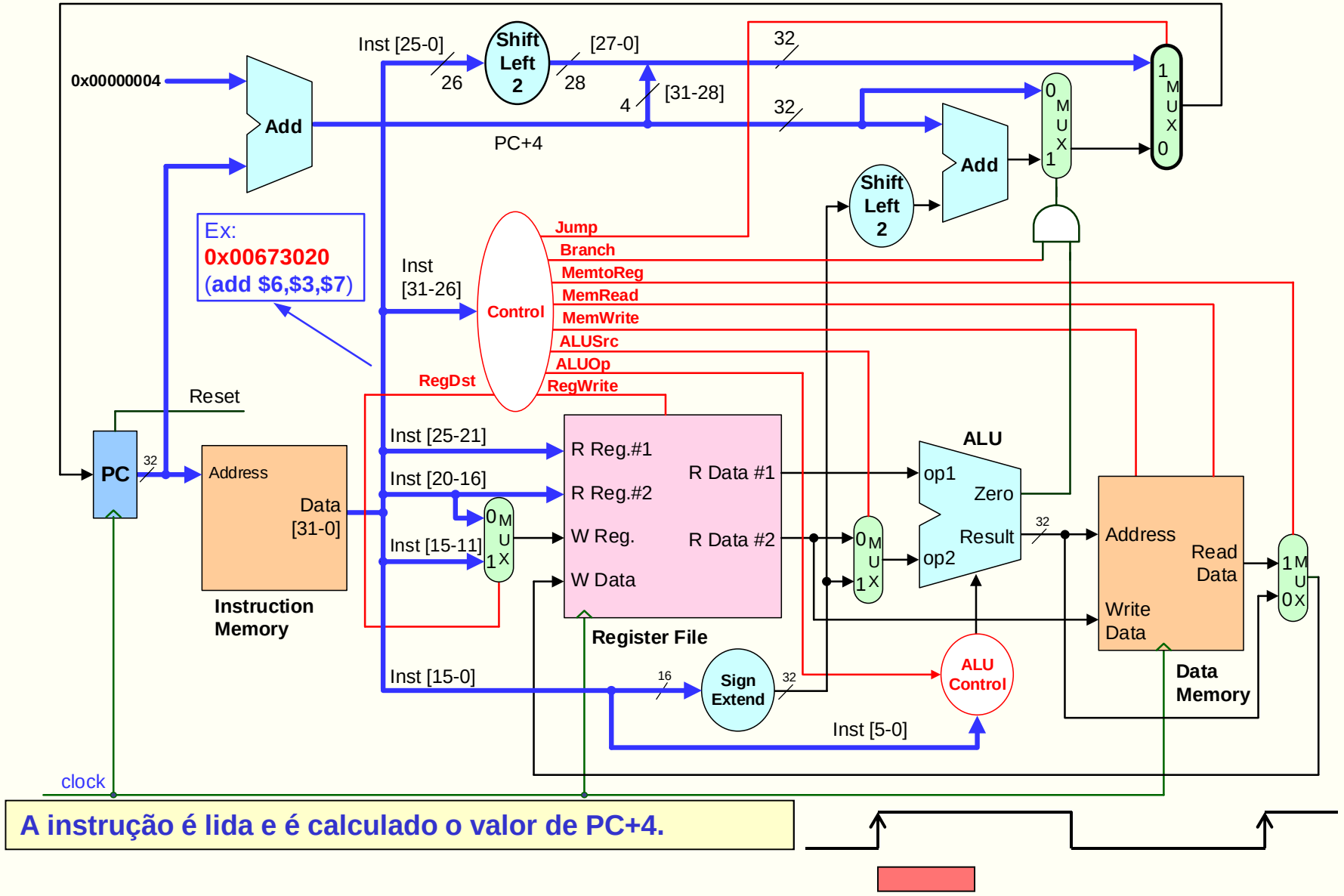
Análise do funcionamento do *datapath* – operações

- *Fetch* de uma instrução e cálculo do endereço da próxima instrução
- Leitura de dois registos do Banco de Registos
- A ALU opera sobre dois valores (a fonte dos valores a operar depende do tipo de instrução que estiver a ser executada)
- O resultado da operação efetuada na ALU:
  - é escrito no Banco de Registos (**R-Type**, **addi** e **slti**)
  - é usado como endereço para escrever na memória de dados (**sw**)
  - é usado como endereço para fazer uma leitura da memória de dados (**lw**) - o valor lido da memória de dados é depois escrito no Banco de Registos
  - é usado para decidir qual o próximo valor do PC (**beq** / **bne**): BTA ou PC+4

Funcionamento do *datapath* nas instruções tipo R

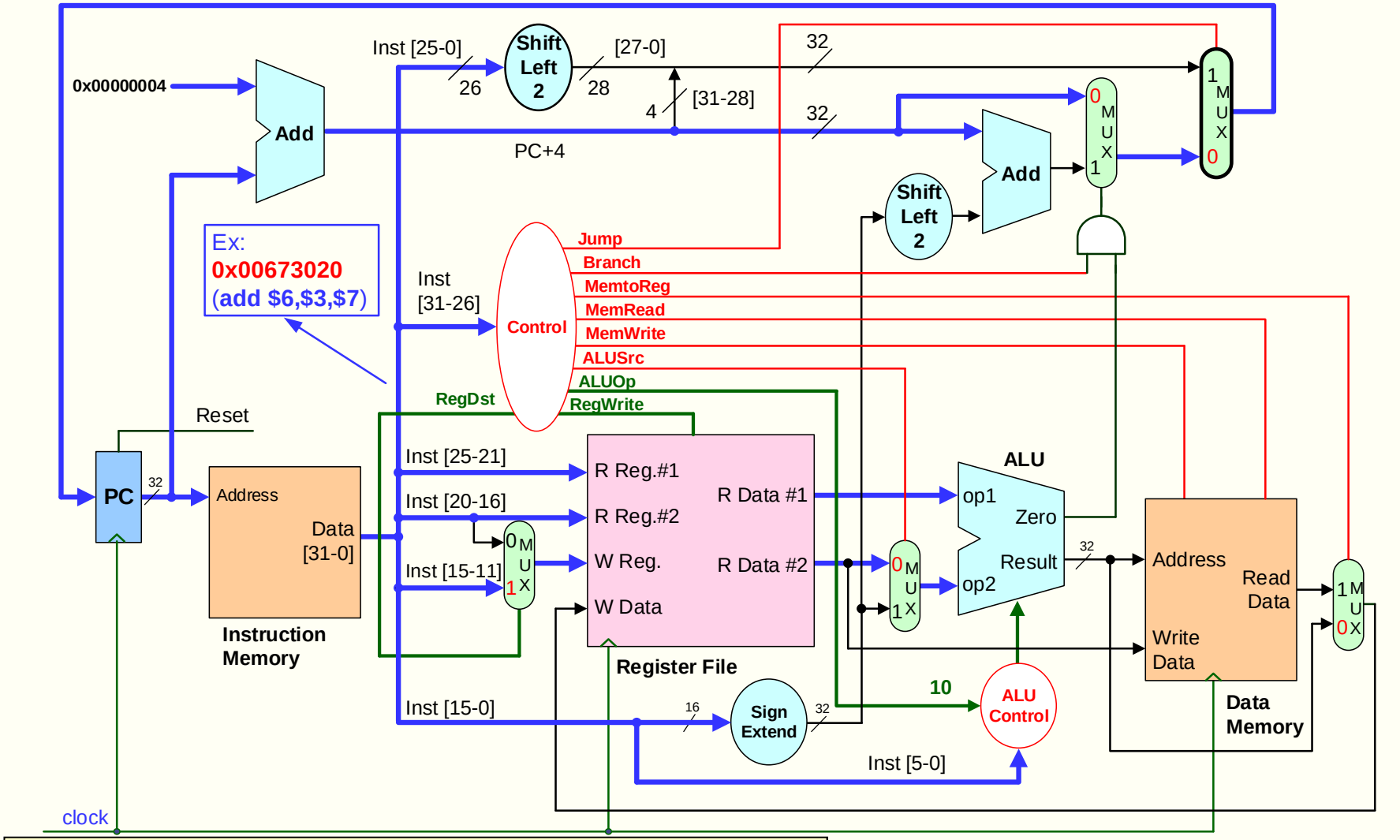
- A instrução é lida e é calculado o valor de PC+4
- São lidos dois registos e a unidade de controlo determina, a partir do *opcode* (**bits 31-26**), o estado dos sinais de controlo
- A ALU opera sobre os dados lidos dos dois registos, de acordo com a função codificada no campo *funct* (**bits 5-0**) da instrução
- O resultado produzido pela ALU será escrito no registo especificado nos **bits 15-11** da instrução ("**rd**"), na próxima transição ativa do relógio

Funcionamento do *datapath* nas instruções tipo R (1)

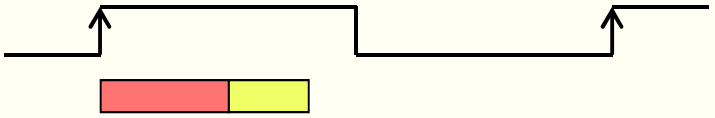


A instrução é lida e é calculado o valor de PC+4.

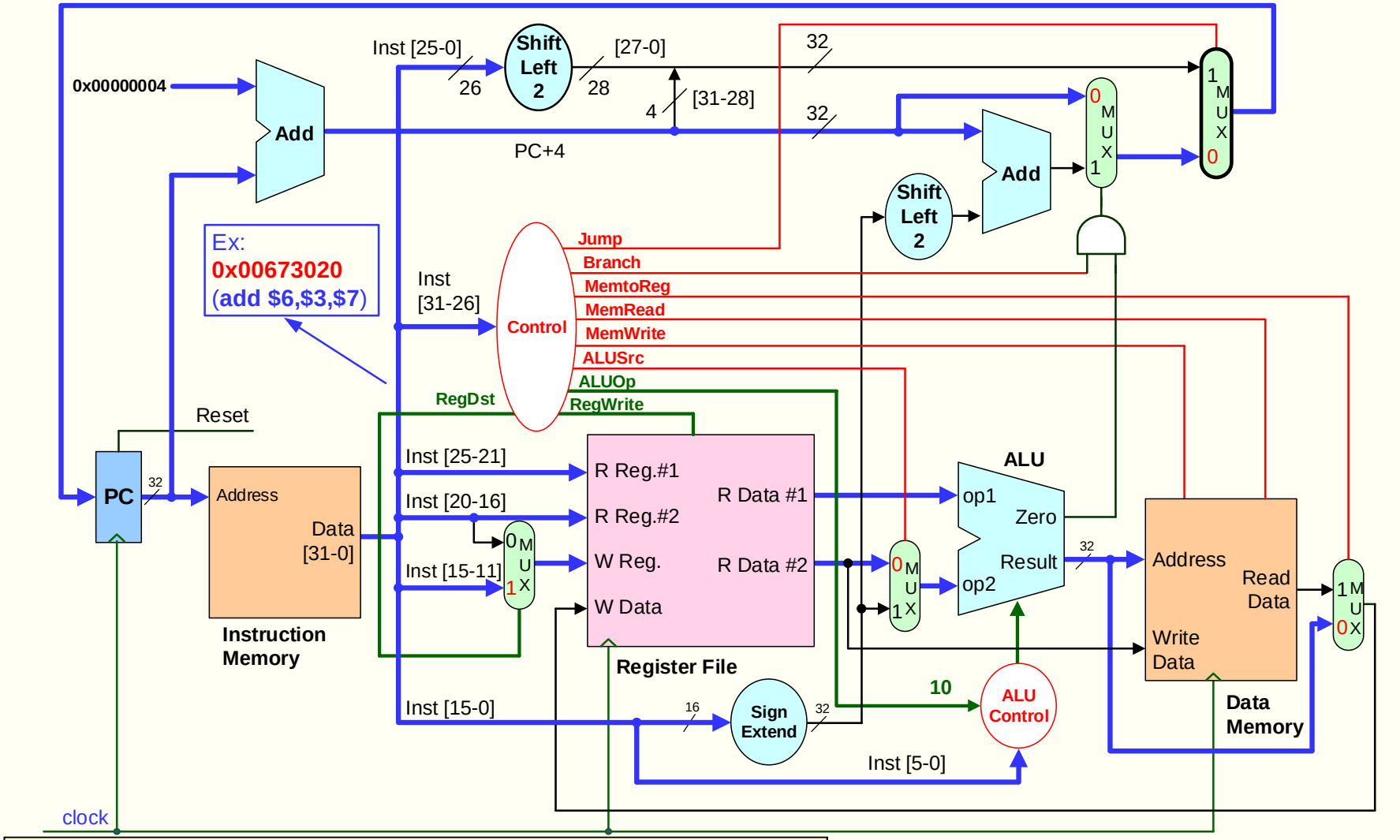
Funcionamento do *datapath* nas instruções tipo R (2)



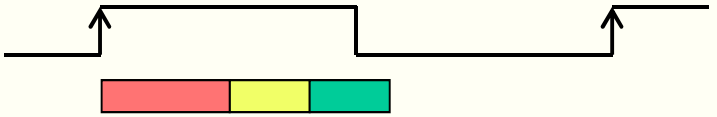
São lidos dois registos e a unidade de controlo determina, a partir do opcode (bits 31-26), o estado dos sinais de controlo.



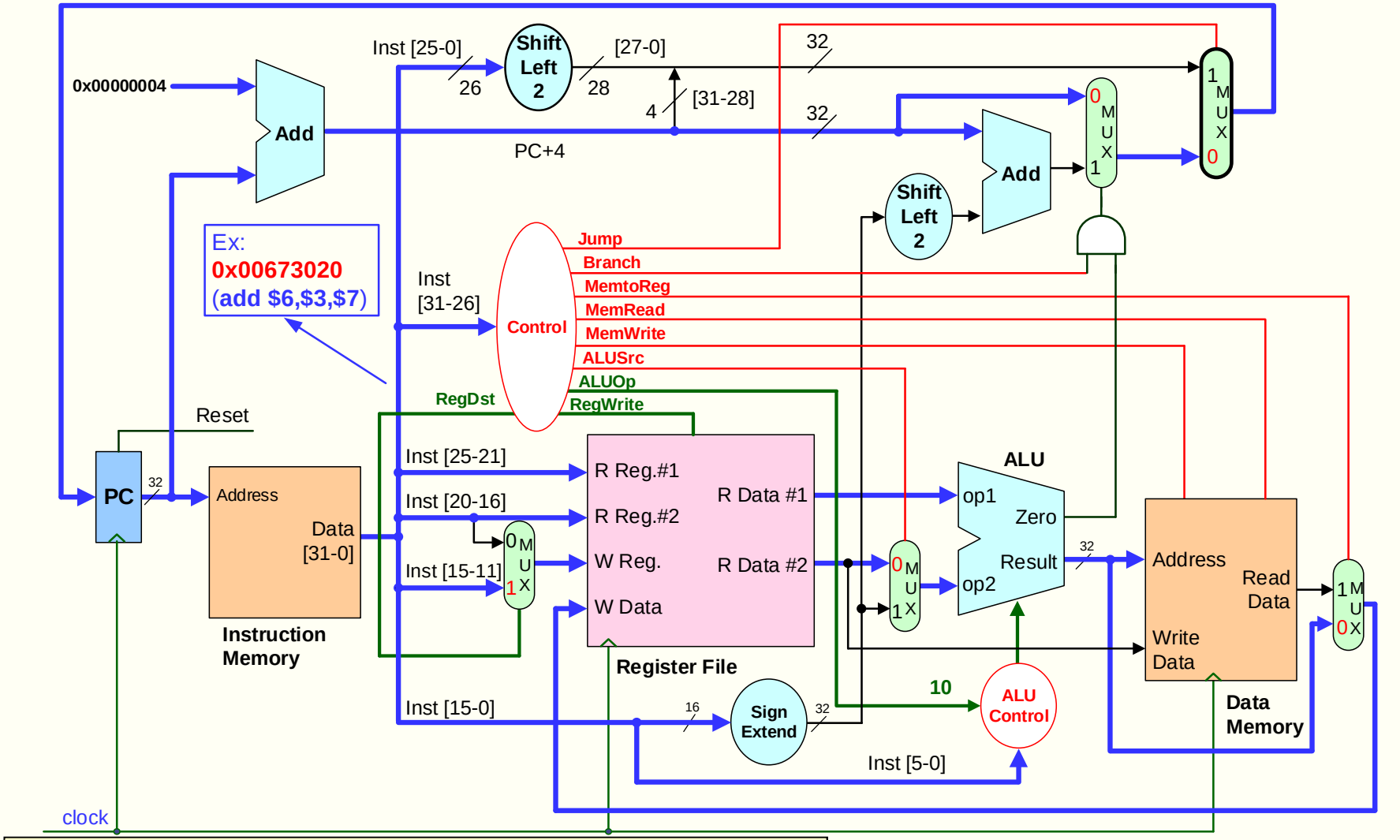
Funcionamento do *datapath* nas instruções tipo R (3)



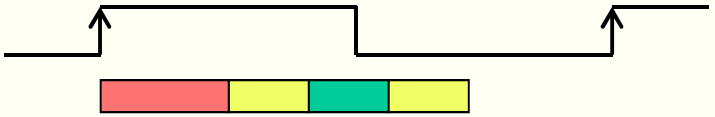
A ALU opera sobre os dados lidos dos dois registos, de acordo com a função codificada nos bits [5-0] da instrução.



Funcionamento do *datapath* nas instruções tipo R (4)



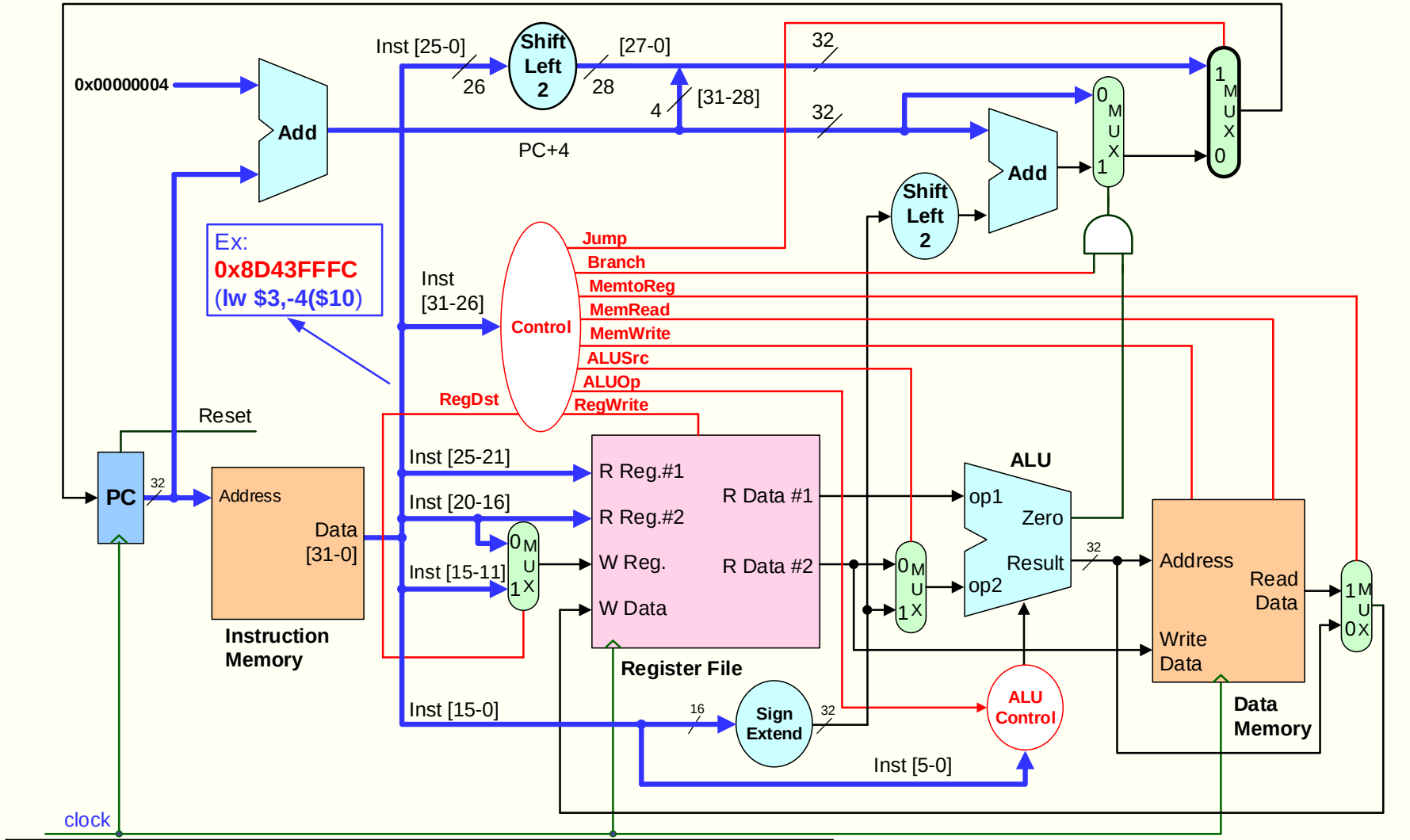
O resultado produzido pela ALU será escrito no registo especificado nos bits 15-11 da instrução (rd), na próxima transição ativa do relógio.



Funcionamento do *datapath* na instrução LW

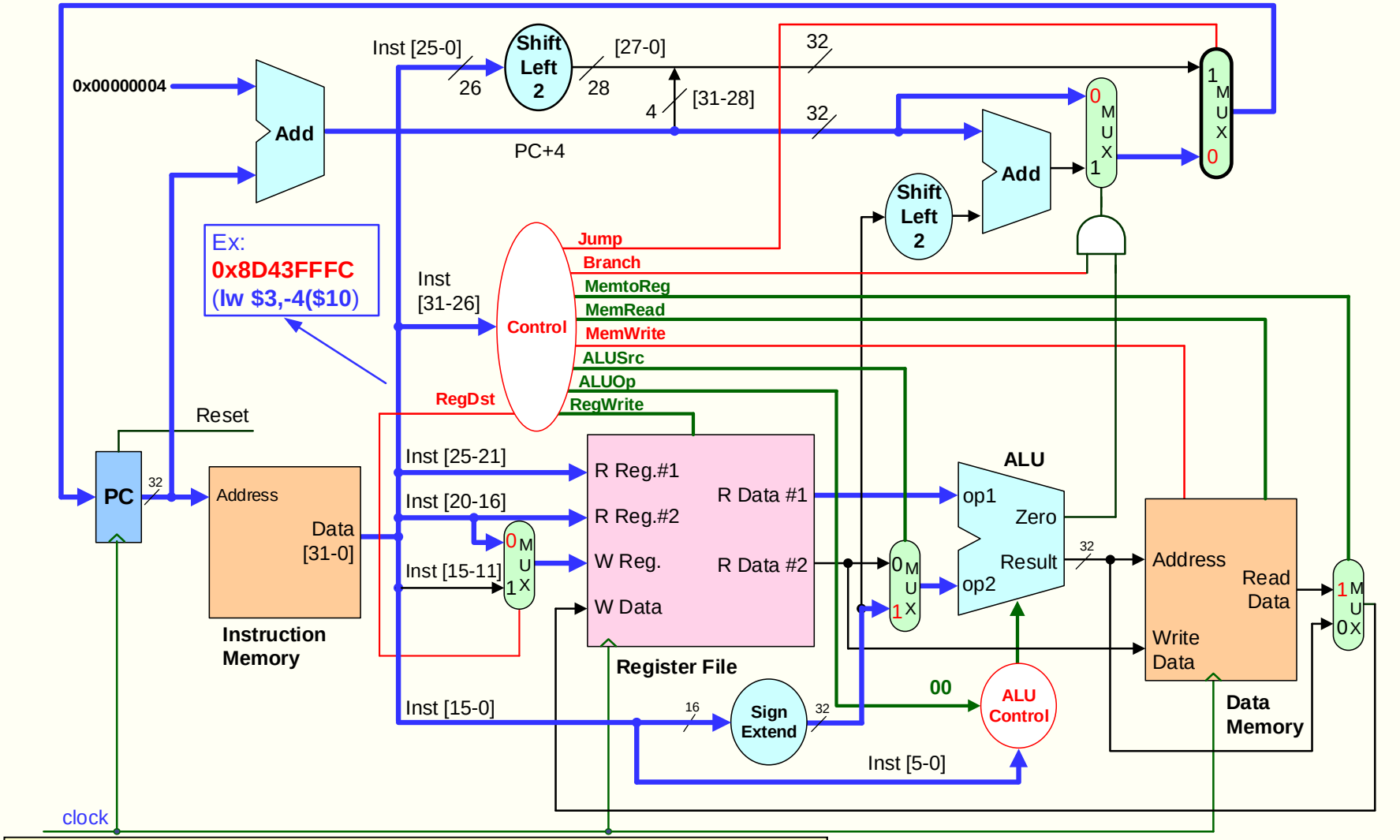
- A instrução é lida e é calculado o valor de PC+4.
- É lido um registo e a unidade de controlo determina, a partir do *opcode*, o estado dos sinais de controlo.
- A ALU soma o valor lido do registo especificado nos **bits 25-21** ("**rs**") com os 16 bits (extendidos com sinal para 32) do campo *offset* da instrução (**bits15-0**).
- O resultado produzido pela ALU constitui o endereço de acesso à memória de dados. A memória é lida nesse endereço.
- A *word* lida da memória será escrita no registo especificado nos **bits 20-16** da instrução ("**rt**"), na próxima transição ativa do relógio.

Funcionamento do *datapath* na instrução LW (1)

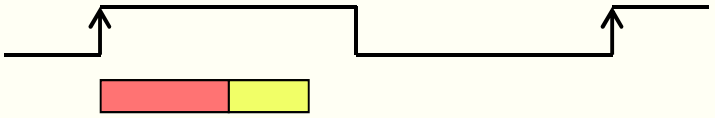


A instrução é lida e é calculado o valor de PC+4.

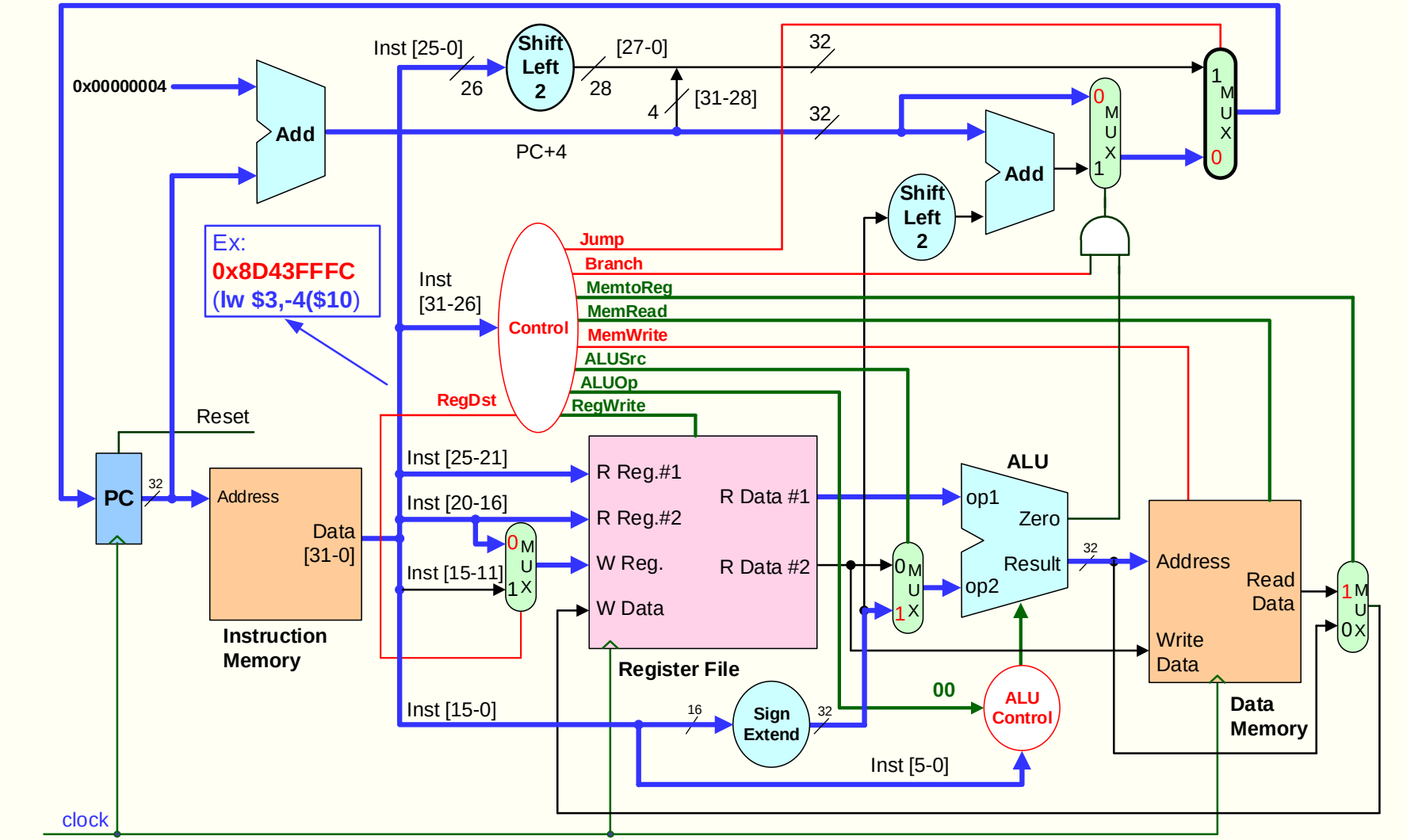
Funcionamento do *datapath* na instrução LW (2)



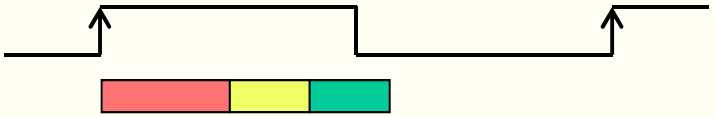
São lidos dois registos e a unidade de controlo determina, a partir do opcode (bits 31-26), o estado dos sinais de controlo.



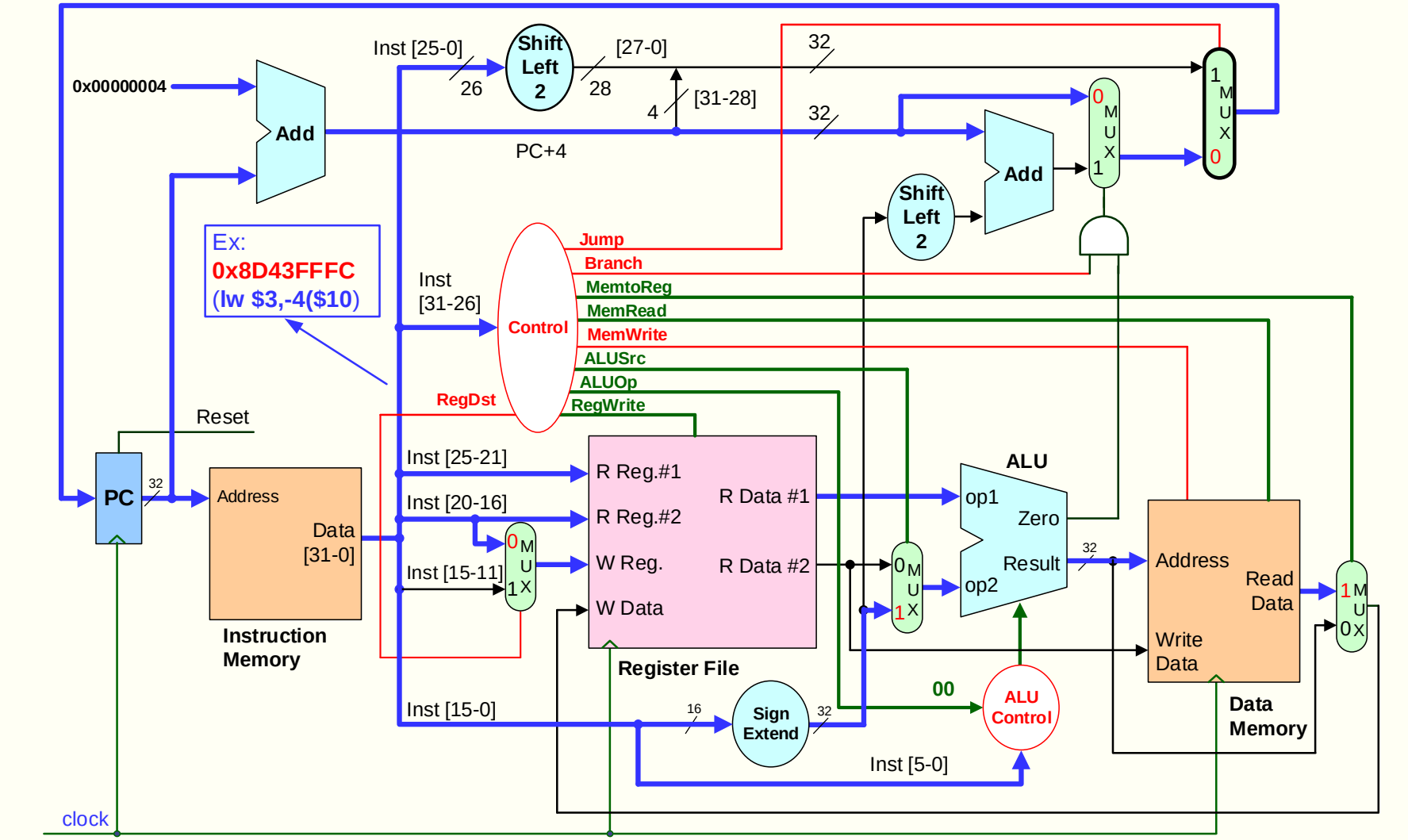
Funcionamento do *datapath* na instrução LW (3)



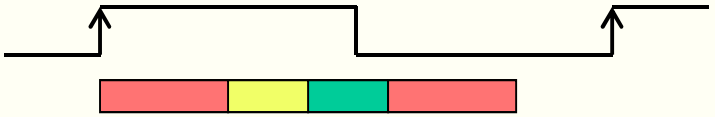
A ALU soma o valor lido do registo com os 16 bits (extendidos com sinal para 32) do campo *offset* da instrução (bits15-0).



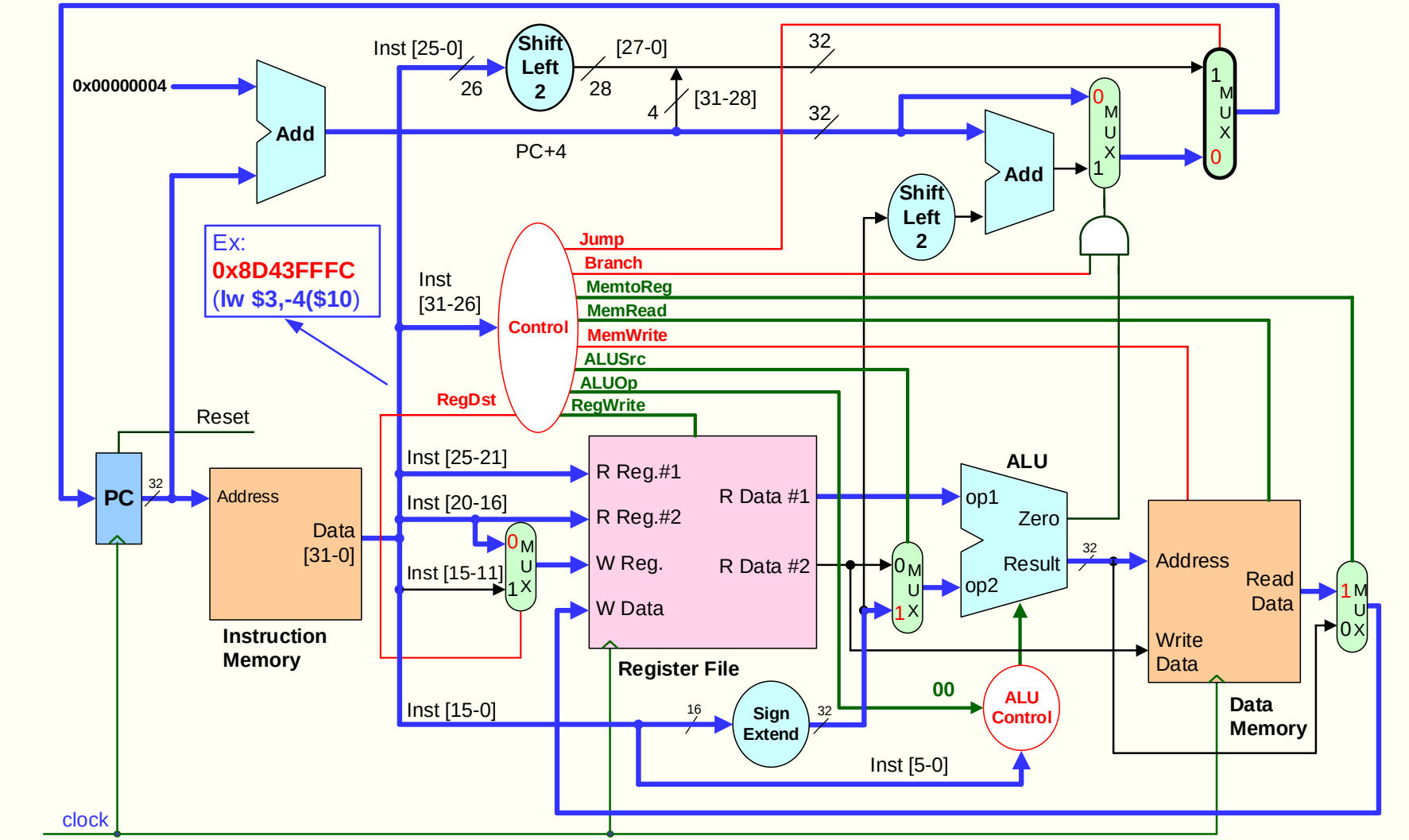
Funcionamento do *datapath* na instrução LW (4)



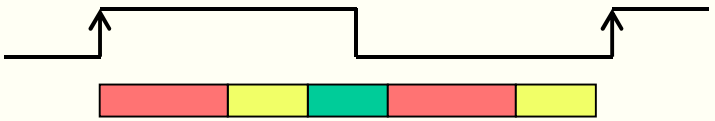
O resultado produzido pela ALU constitui o endereço de acesso à memória de dados. A memória é lida nesse endereço.



Funcionamento do *datapath* na instrução LW (5)



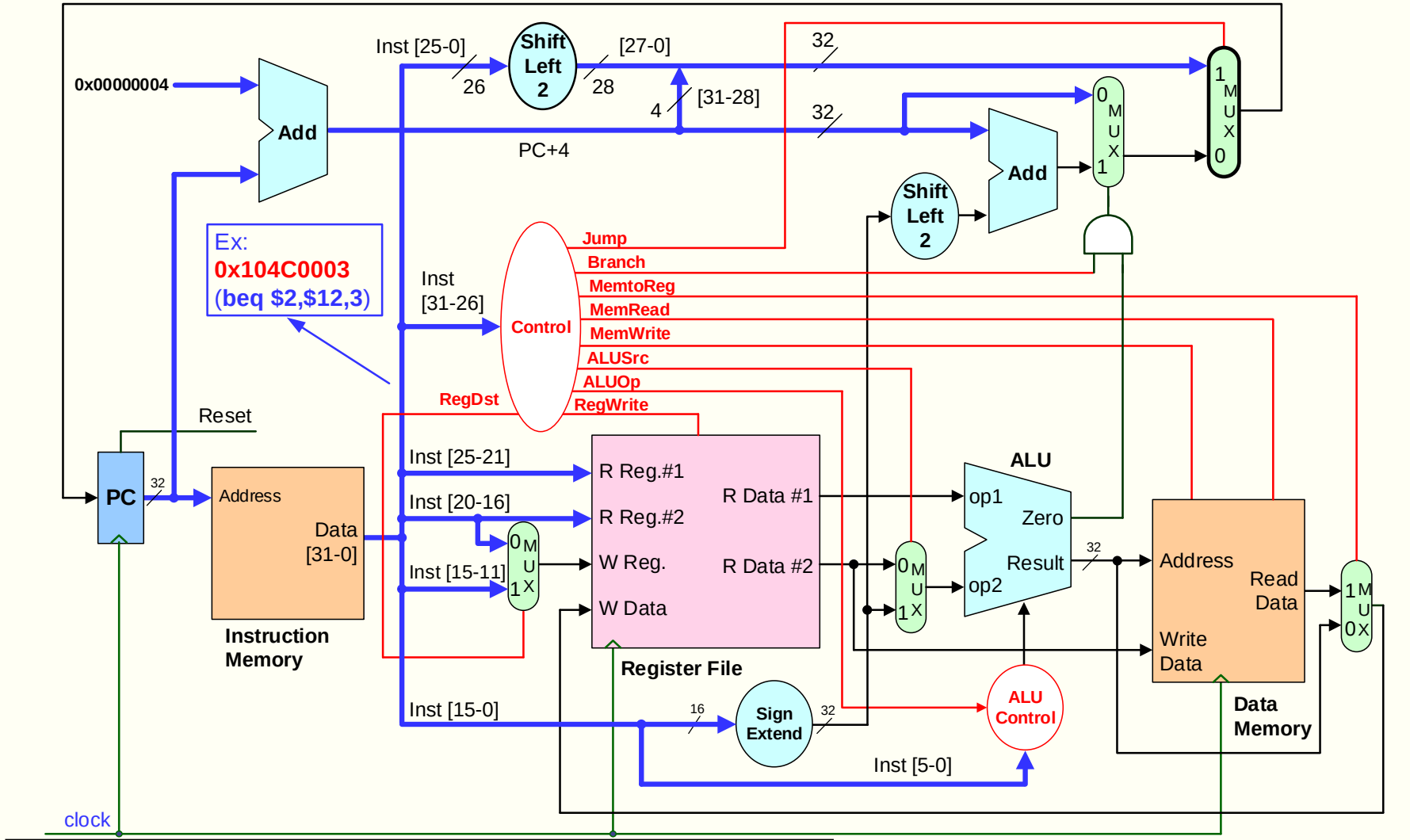
A *word* lida da memória será escrita no registo especificado nos bits 20-16 da instrução (rt), na próxima transição ativa do relógio.



Funcionamento do *datapath* na instrução BEQ

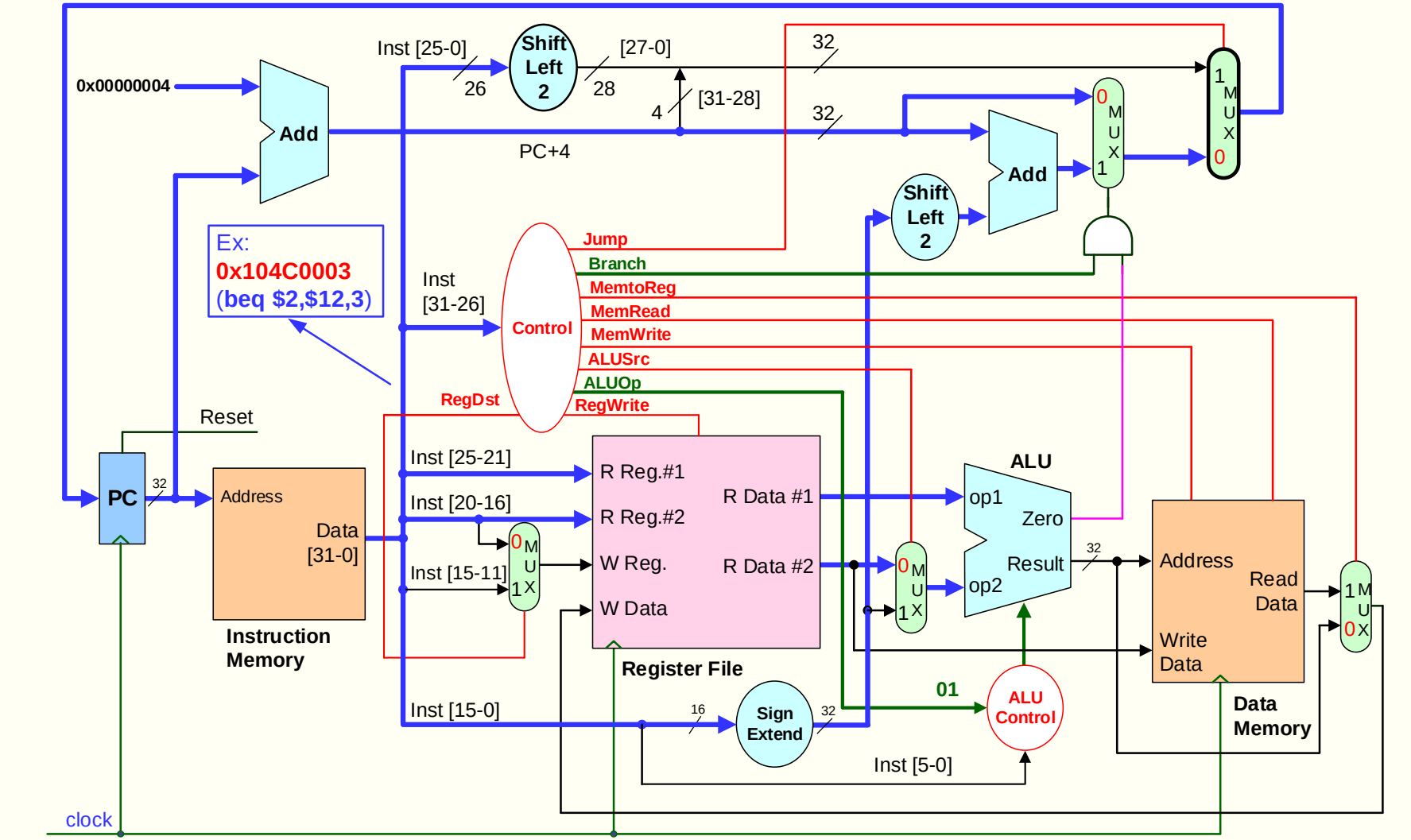
- A instrução é lida e é calculado o valor de PC+4
- São lidos dois registos e é determinado o estado dos sinais de controlo. Os 16LSBs da instrução (sign extended x 4) são somados a PC+4 (BTA)
- A ALU faz a subtração dos dois valores lidos dos registos
- A saída "Zero" da ALU é utilizada para decidir qual o próximo valor do PC, que será atualizado na próxima transição ativa do relógio

Funcionamento do *datapath* na instrução BEQ (1)

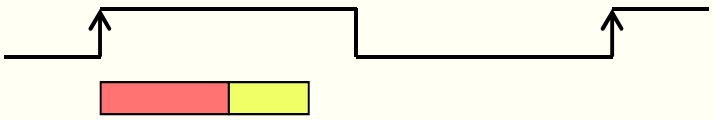


A instrução é lida e é calculado o valor de PC+4.

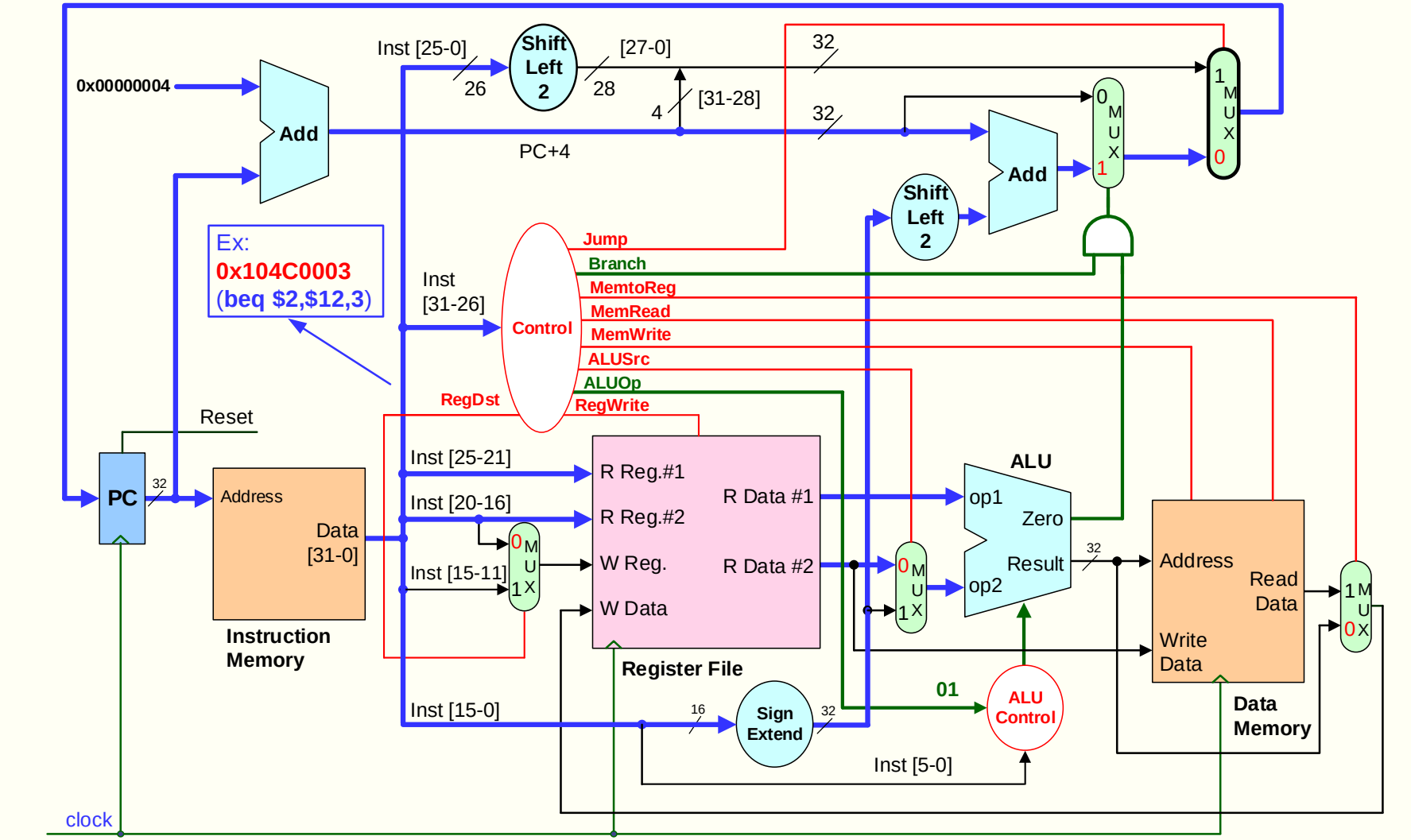
Funcionamento do *datapath* na instrução BEQ (2)



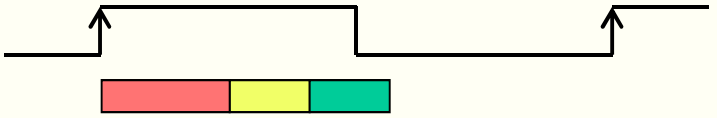
São lidos dois registos e é determinado o estado dos sinais de controlo. Os 16LSBs da instrução (sign extended x 4) são somados a PC+4.



Funcionamento do *datapath* na instrução BEQ (3)



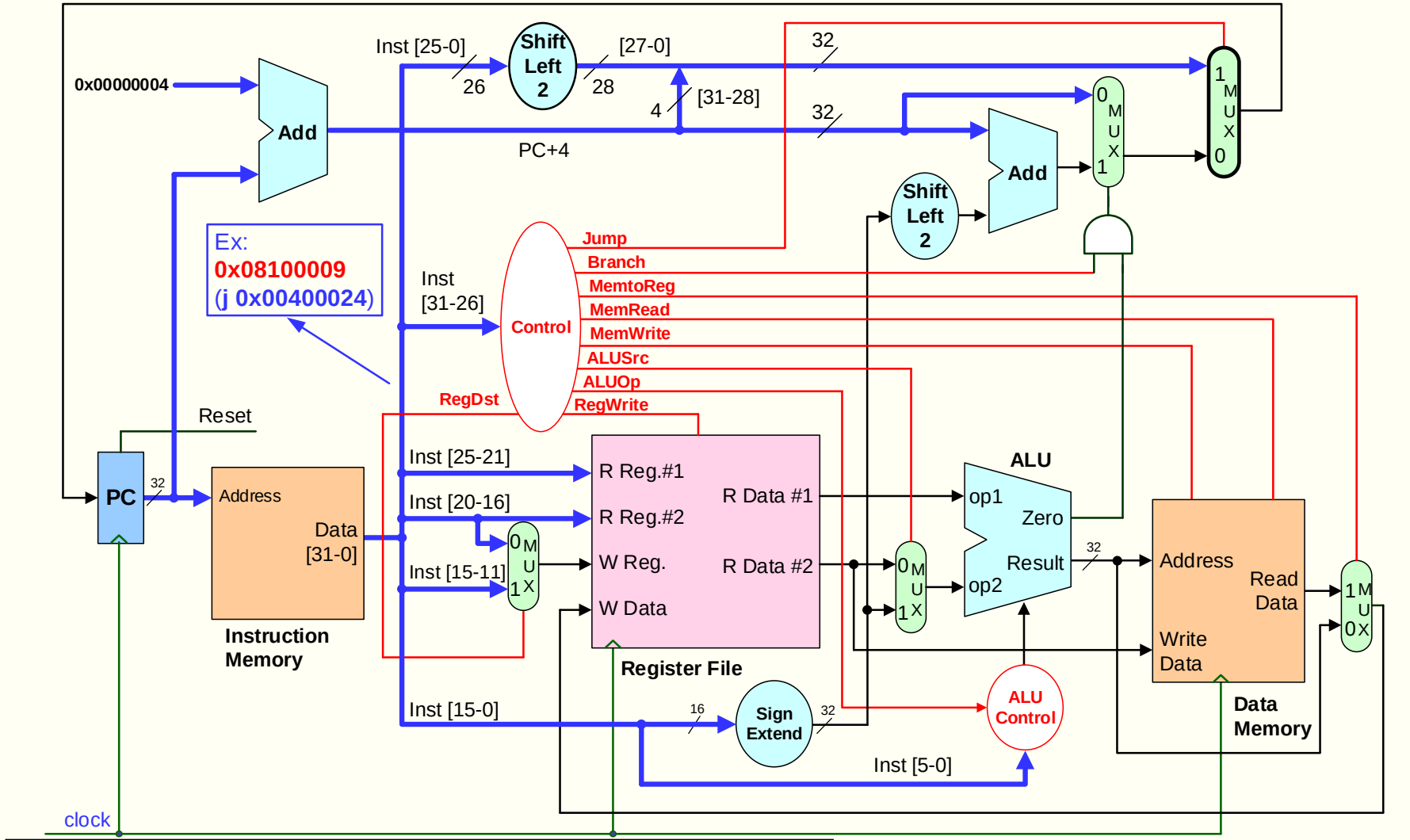
A ALU faz a subtração dos dois valores lidos dos registos. A saída "Zero" é utilizada para decidir qual o próximo valor do PC (Zero=0: PC+4; Zero=1: BTA)



Funcionamento do *datapath* na instrução J

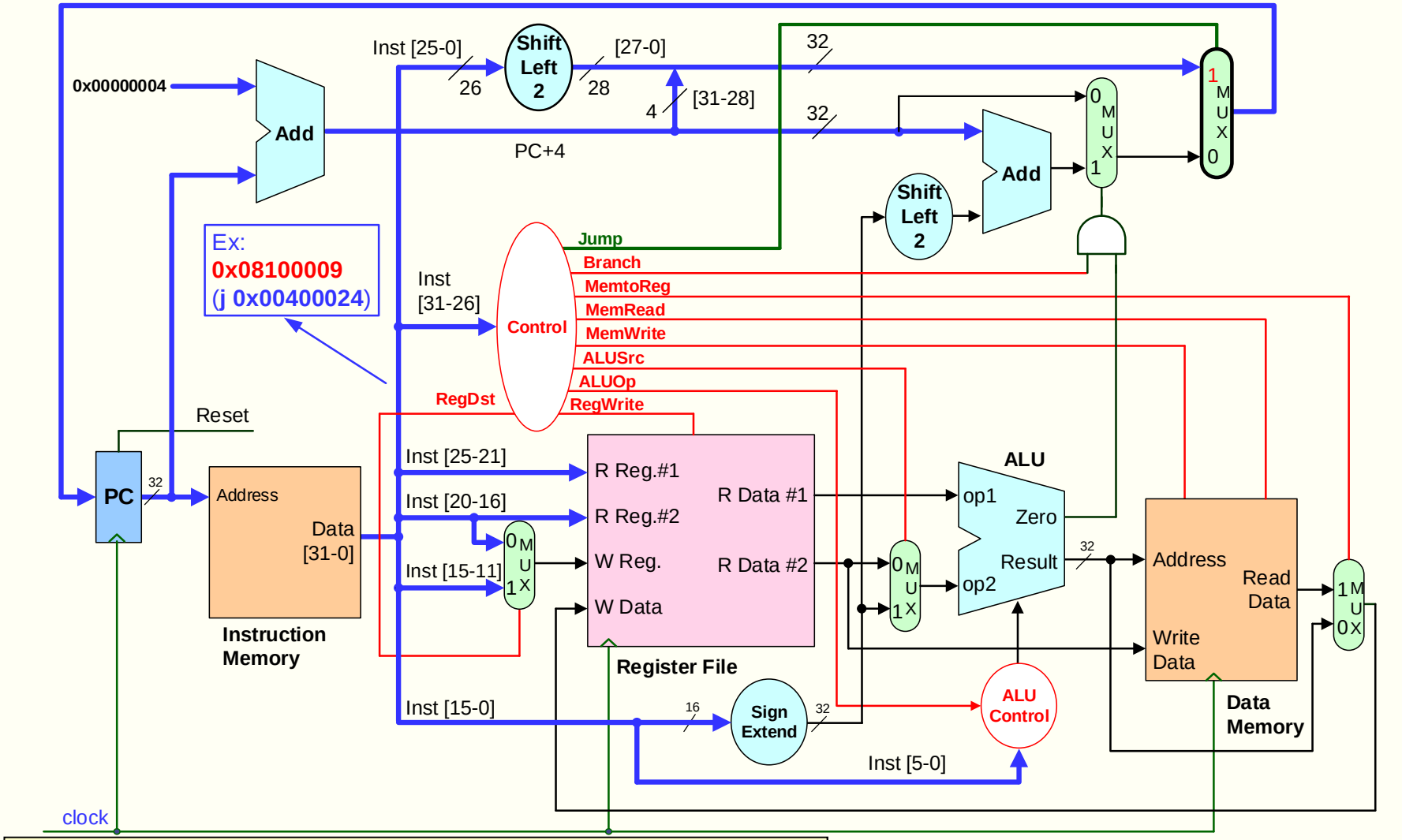
- A instrução é lida e é calculado o valor de PC+4
- São determinados os sinais de controlo. O novo valor do PC é obtido a partir dos 26 LSB da instrução multiplicados por 4 (*shift left 2*) concatenados com os 4 bits mais significativos do PC atual

Funcionamento do *datapath* na instrução J (1)

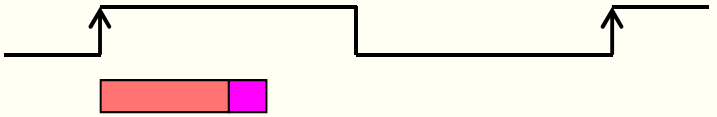


A instrução é lida e é calculado o valor de PC+4.

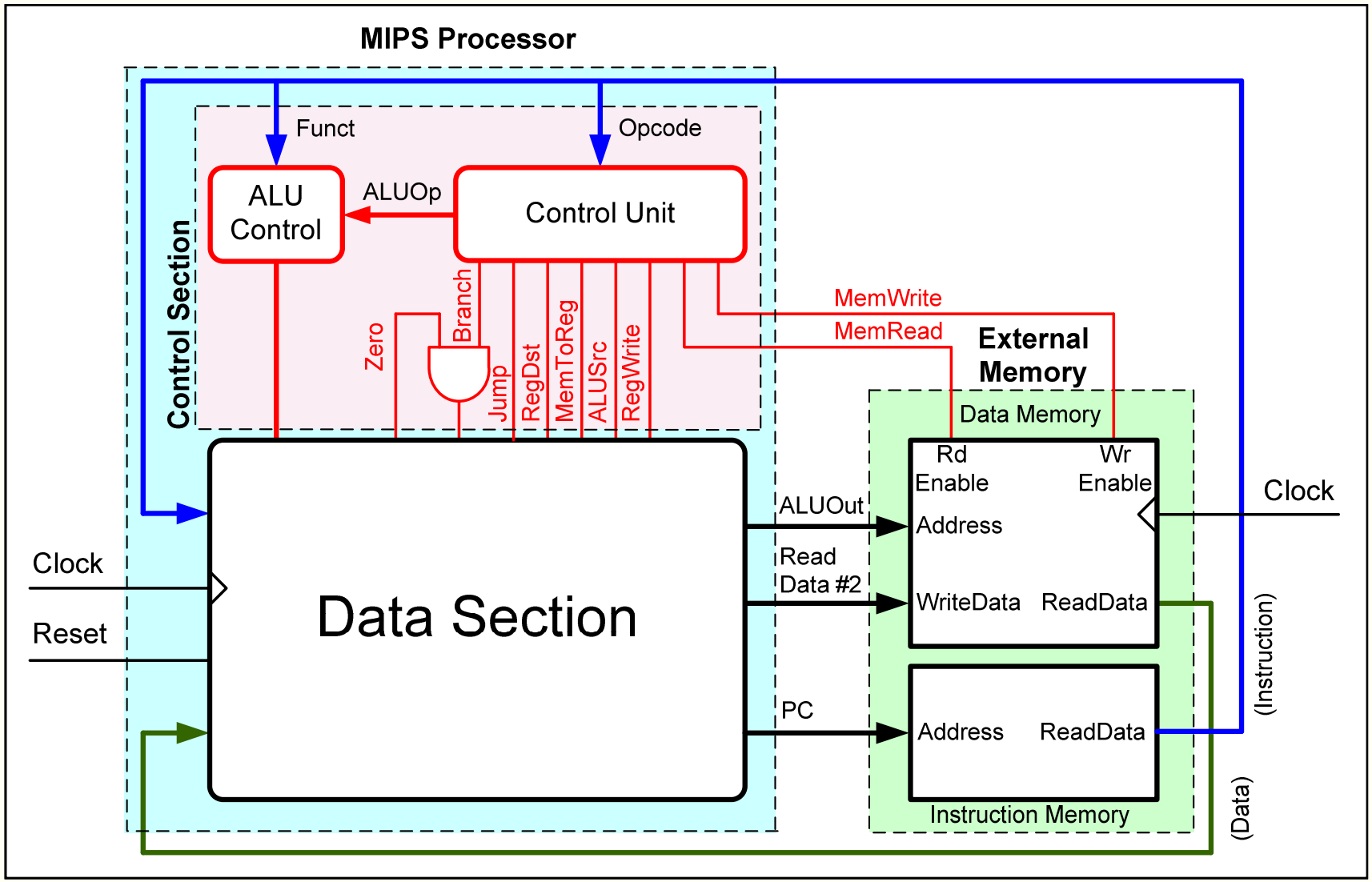
Funcionamento do *datapath* na instrução J (2)



O novo valor do PC é obtido a partir dos 26 LSB da instrução multiplicados por 4 (shift left 2) concatenados com os 4 MSB do PC atual.



Visão global do processador



Execução de uma instrução no DP *single-cycle* – exemplo

- Vai iniciar-se o *instruction fetch* da instrução apontada pelo registo $PC (**`0x00400024`**). Nesse instante o conteúdo dos registos do CPU e da memória de dados é o indicado. **Qual o conteúdo dos registos após a execução da instrução?**

Endereço	Valor
(…)	(…)
0x10010030	0x63F78395
0x10010034	0xA0FCF3F0
0x10010038	0x147FAF83
(…)	(…)

$PC	0x00400024
$3	0x7F421231
$4	0x15A73C49
$5	0x10010010

Endereço	Código máquina
(…)	(…)
0x00400020	0x00E82820
0x00400024	0x8CA30024
0x00400028	0x00681824
(…)	(…)

$PC	0x00400028
$3	0xA0FCF3F0
$4	0x15A73C49
$5	0x10010010

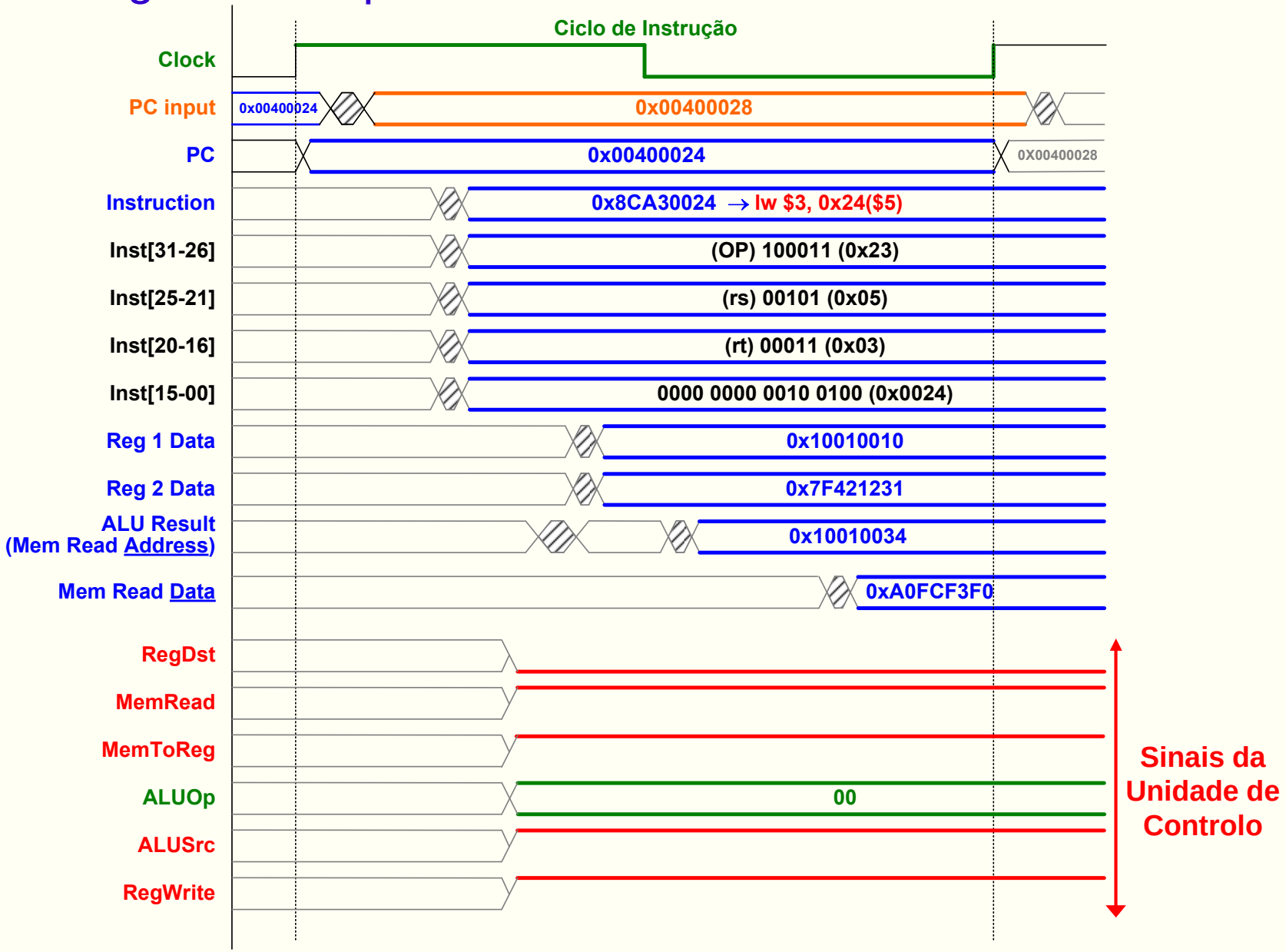
0x8CA30024 → lw $3, 0x24($5)

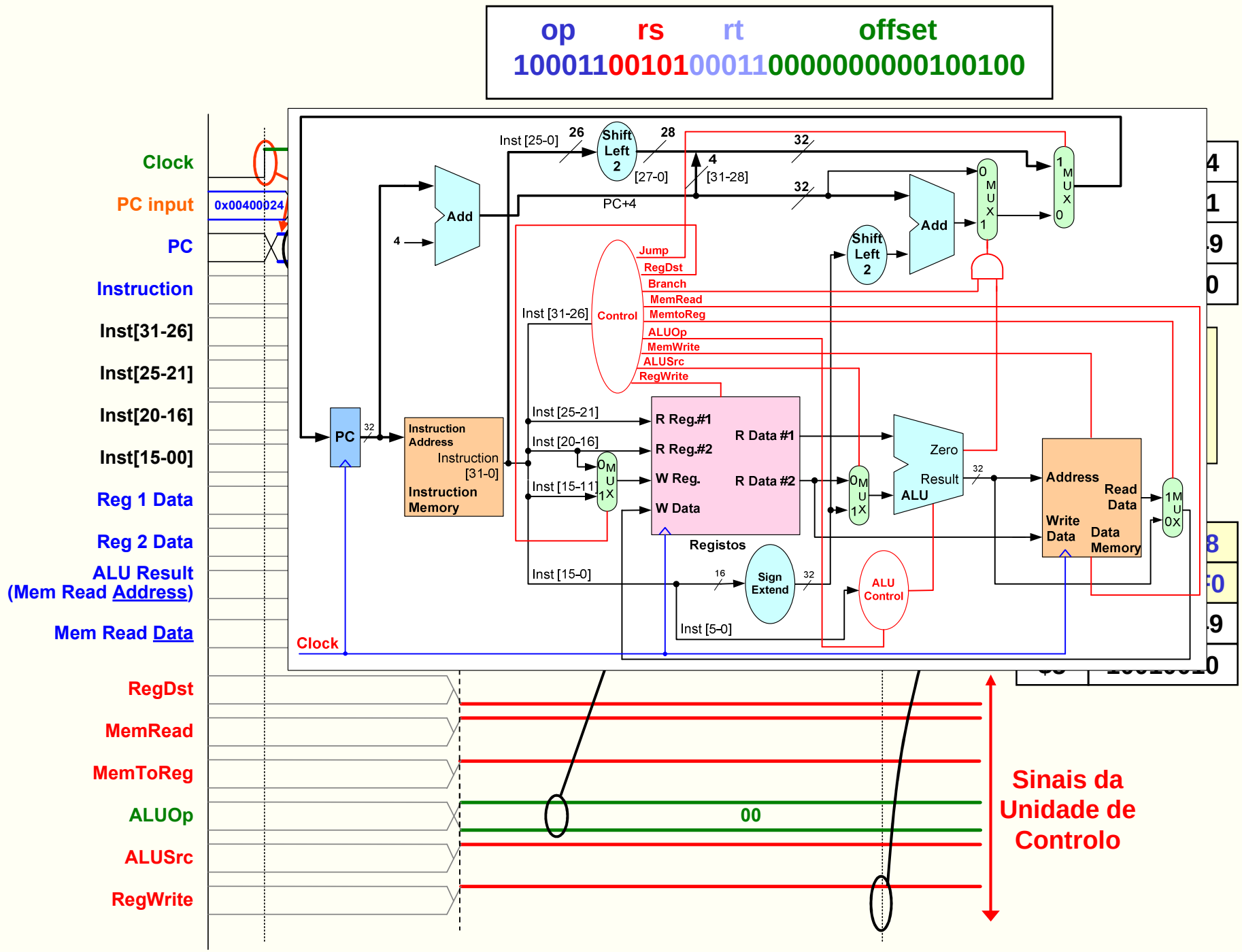
Mem Addr: 0x10010010 + 0x24 = 0x10010034

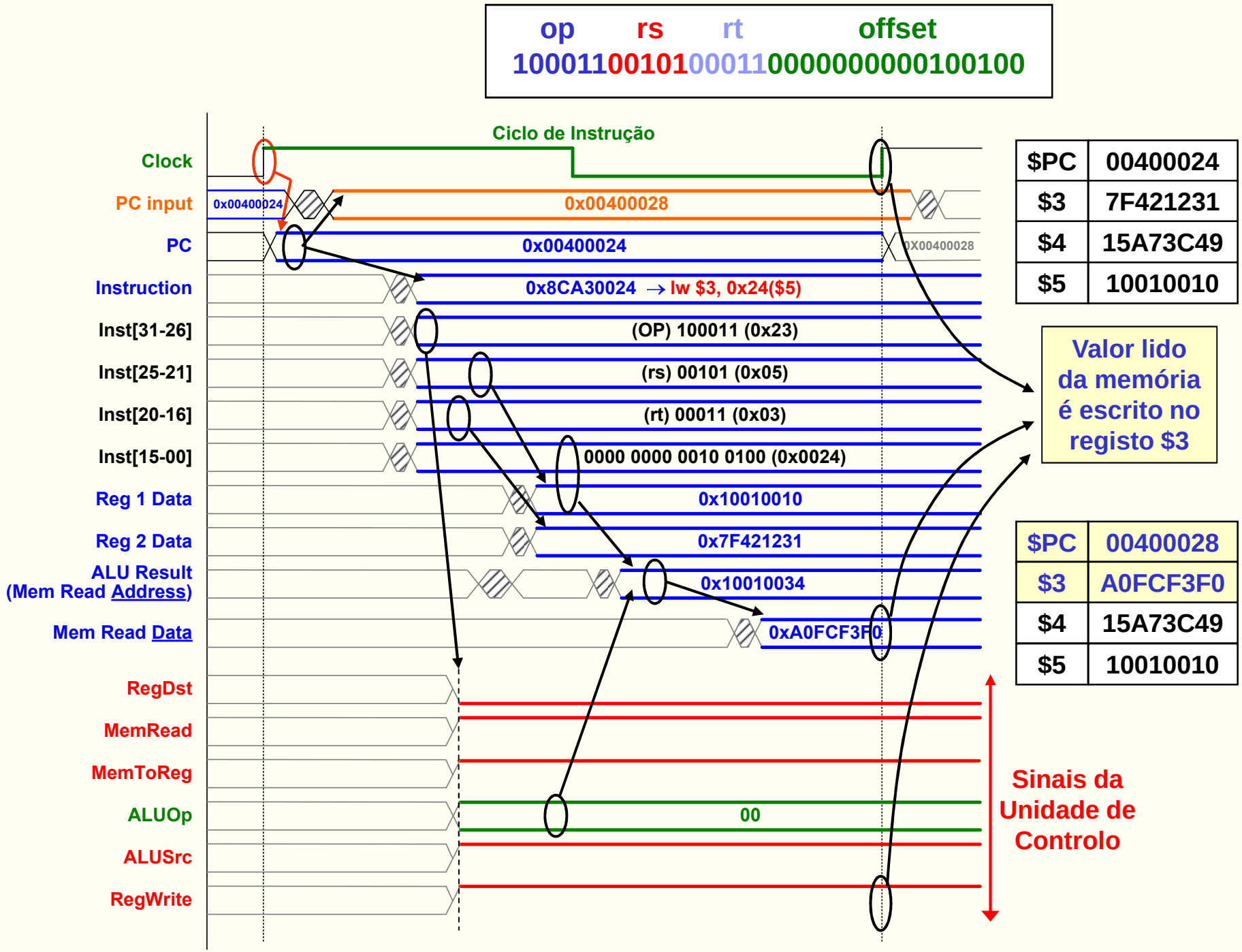
10001100101000110000000000100100

$3 = [0x10010034] = 0xA0FCF3F0

Execução de uma instrução no DP *single-cycle* – diagrama temporal




op rs rt offset
10001100101000110000000000100100
Clock
PC input
PC
Instruction
Inst[31-26]
Inst[25-21]
Inst[20-16]
Inst[15-00]
Reg 1 Data
Reg 2 Data
ALU Result (Mem Read Address)
Mem Read Data
RegDst
MemRead
MemToReg
ALUOp
ALUSrc
RegWrite
0x00400024
Add
4
PC+4
Inst [25-0]
26
Shift Left 2
28
[27-0]
[31-28]
32
Jump
RegDst
Branch
MemRead
MemtoReg
ALUOp
MemWrite
ALUSrc
RegWrite
Control
Inst [31-26]
PC
Instruction Address
Instruction [31-0]
Instruction Memory
Inst [25-21]
Inst [20-16]
Inst [15-11]
Inst [15-0]
Inst [5-0]
R Reg.#1
R Reg.#2
W Reg.
W Data
R Data #1
R Data #2
Registos
Sign Extend
16
ALU Control
Zero
Result
ALU
Address
Read Data
Write Data
Data Memory
MUX
Clock
00
Sinais da Unidade de Controlo


op rs rt offset
10001100101000110000000000100100
Ciclo de Instrução
Clock
PC input
PC
Instruction
Inst[31-26]
Inst[25-21]
Inst[20-16]
Inst[15-00]
Reg 1 Data
Reg 2 Data
ALU Result (Mem Read Address)
Mem Read Data
RegDst
MemRead
MemToReg
ALUOp
ALUSrc
RegWrite
0x00400024
0x00400028
0x00400024
0x8CA30024 → lw $3, 0x24($5)
(OP) 100011 (0x23)
(rs) 00101 (0x05)
(rt) 00011 (0x03)
0000 0000 0010 0100 (0x0024)
0x10010010
0x7F421231
0x10010034
0xA0FCF3F0
00
$PC 00400024
$3 7F421231
$4 15A73C49
$5 10010010
Valor lido da memória é escrito no registo $3
$PC 00400028
$3 A0FCF3F0
$4 15A73C49
$5 10010010
Sinais da Unidade de Controlo

Exercícios

- De que tipo é a unidade de controlo principal do *datapath single-cycle*?
- Como calcularia o tempo mínimo necessário para executar cada uma das instruções anteriormente analisadas?
- O que limita a frequência máxima do relógio do *datapath single-cycle*?
- Que alterações é necessário fazer ao *datapath single-cycle* para permitir a execução das instruções:
  - "**`bne`**" – branch not equal
  - "**`jal`**" – jump and link
  - "**`jr`**" – jump register
- Analise o *datapath* e identifique que instruções deixariam de funcionar corretamente se a unidade de controlo bloqueasse o sinal **`RegWrite`** a '**`1`**'.
- Repita o exercício anterior para cada uma das seguintes situações: **`RegWrite='0'`**, **`MemRead='0'`**, **`MemWrite='0'`**, **`ALUop="00"`**, **`RegDst='1'`**, **`ALUSrc='0'`**, **`MemtoReg='0'`**, **`MemtoReg='1'`**
- Que consequência teria para o funcionamento do *datapth* o bloqueio do sinal **`Branch`** a '**`1`**'?