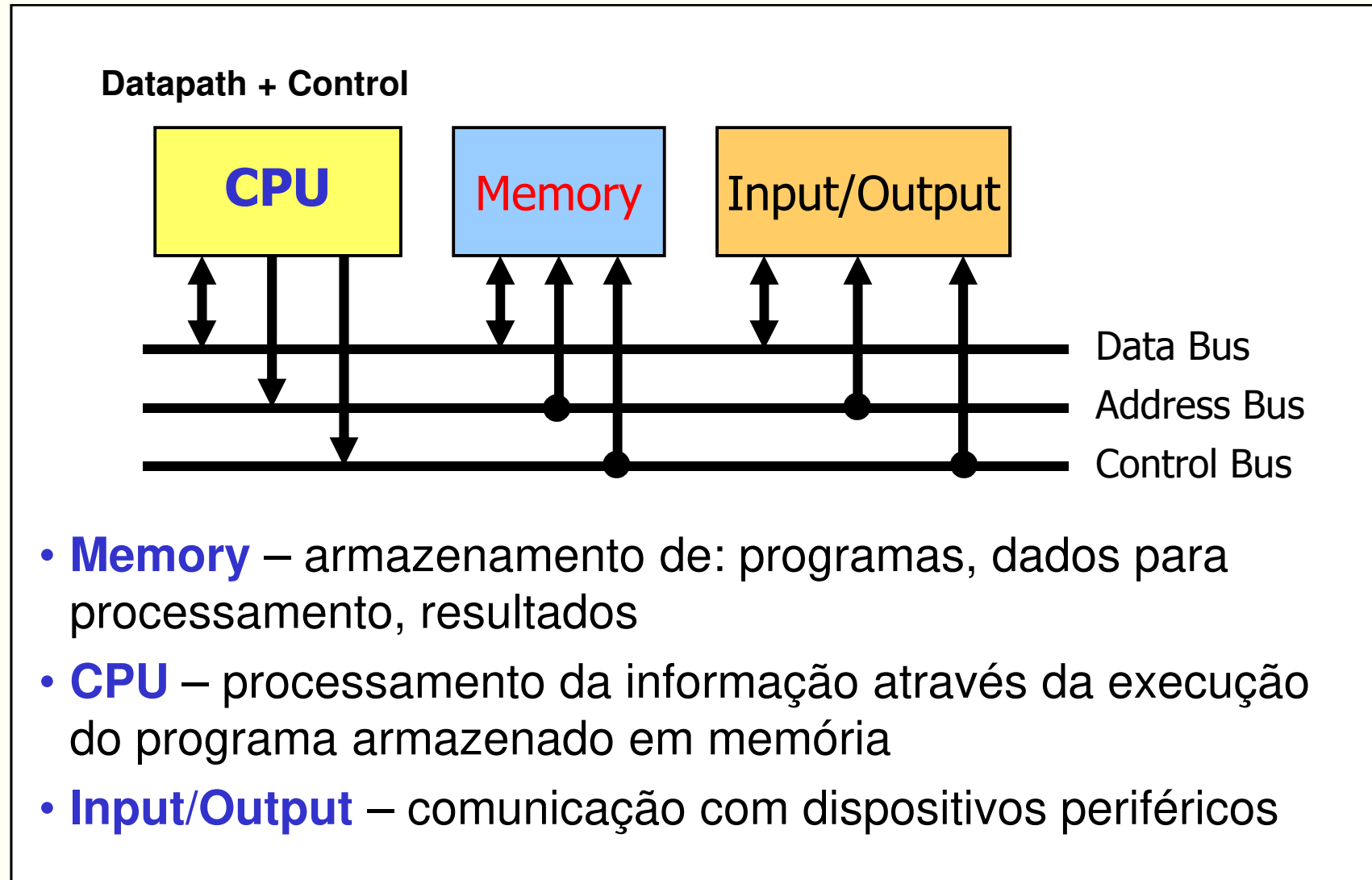


Aulas 12, 13 e 14

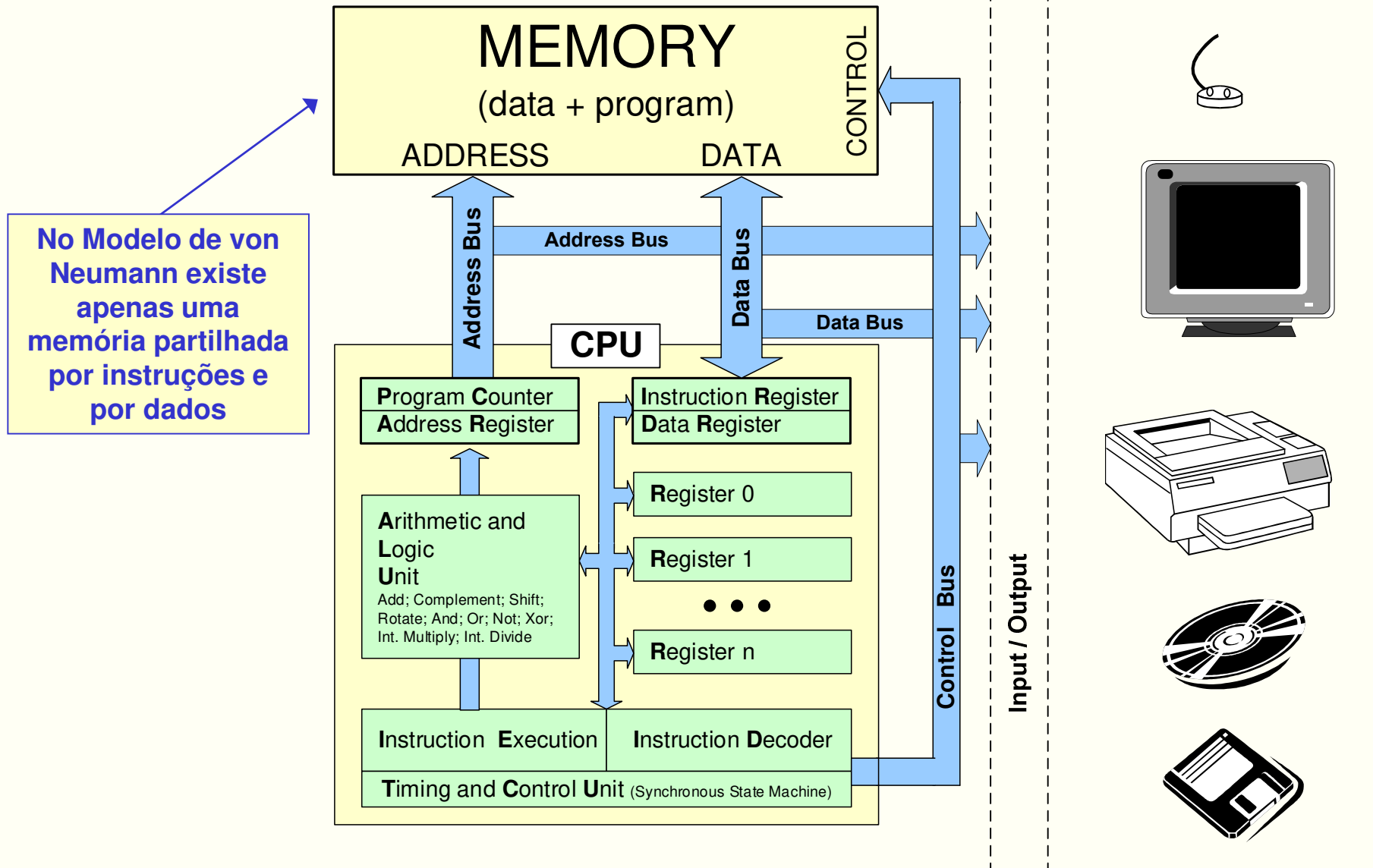
- Modelos de Harvard e Von Neumann
- Pressupostos para a construção de um *datapath* genérico para uma arquitetura tipo MIPS
- Análise dos blocos constituintes necessários à execução de um subconjunto de instruções de cada classe de instruções:
 - Aritméticas e lógicas (add, addi, sub, and, or, slt, slti)
 - Acesso à memória (lw, sw)
 - Controlo de fluxo de execução (beq, bne, j)
- Montagem de um *datapath* completo para execução de instruções num único ciclo de relógio (*single-cycle*)

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

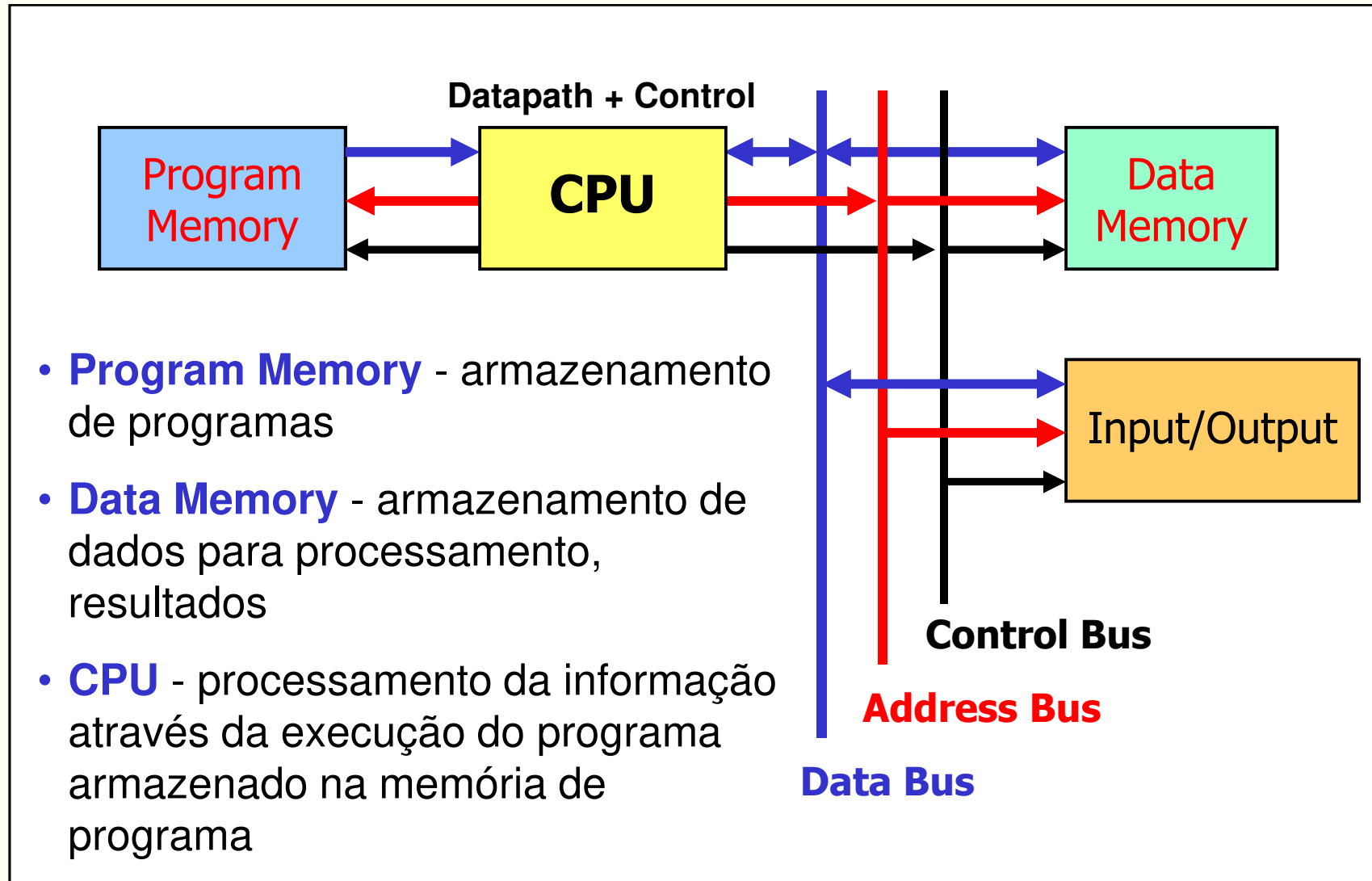
Modelo de von Neumann



Modelo de von Neumann

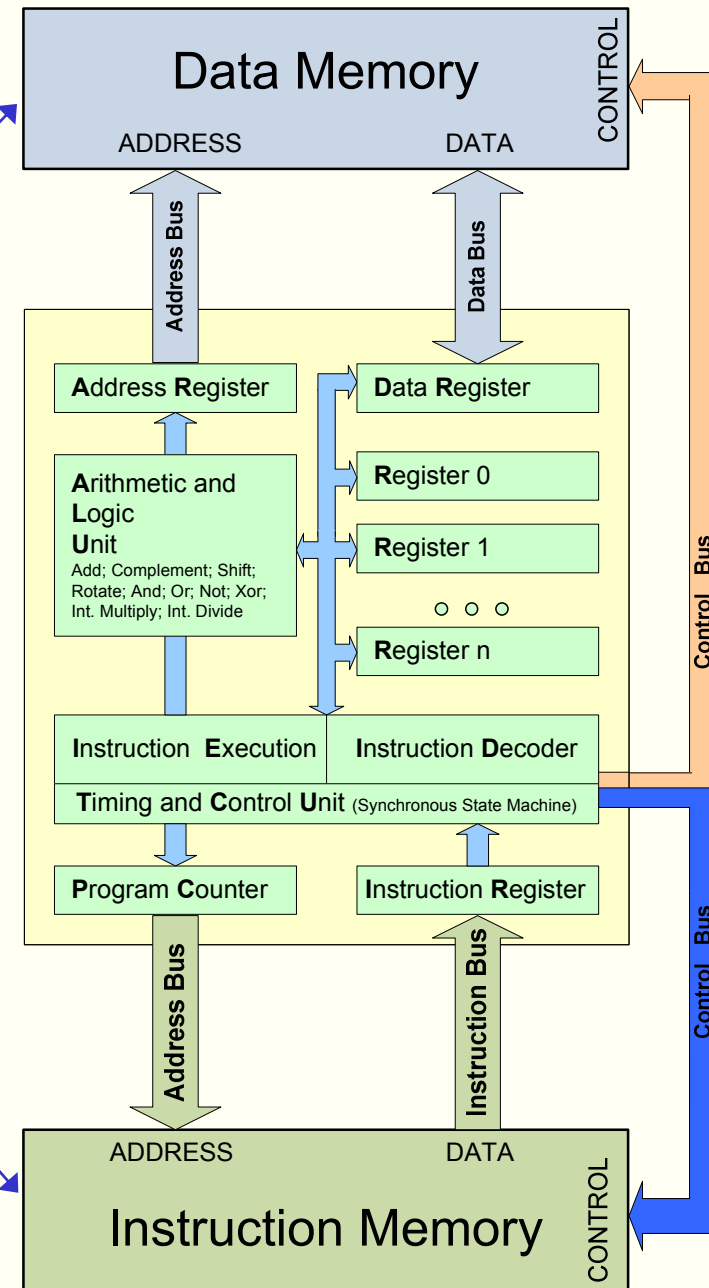


Modelo de Harvard



Modelo de Harvard

No Modelo de Harvard existem duas memórias independentes (uma para instruções e outra para dados) que podem ser acedidas simultaneamente pelo CPU



von Neumann *versus* Harvard – resumo

- **Modelo de von Neumann**

- um único espaço de endereçamento para instruções e dados (i.e. uma única memória)
- acesso a instruções e dados é feito em ciclos de relógio distintos

- **Modelo de Harvard**

- dois espaços de endereçamento separados: um para dados e outro para instruções (i.e. duas memórias independentes)
- possibilidade de acesso, no mesmo ciclo de relógio, a dados e instruções (i.e. CPU pode fazer o *fetch* da instrução e ler os dados que a instrução vai manipular no mesmo ciclo de relógio)
- memórias de dados e instruções podem ter dimensões de palavra diferentes

Implementação de um *Datapath*

- O CPU consiste, fundamentalmente, em duas secções:
 - **Secção de dados** - elementos operativos/funcionais para armazenamento, processamento e encaminhamento da informação:
 - Registos internos
 - Unidade Aritmética e Lógica (ALU)
 - Elementos de encaminhamento (multiplexers)
 - **Unidade de controlo**: responsável pela coordenação dos elementos da secção de dados, durante a execução de cada instrução

Implementação de um *Datapath*

- As unidades funcionais que constituem o *datapath* são de dois tipos:
 - **Elementos combinatórios** (por exemplo a ALU)
 - **Elementos de estado**, isto é, que têm capacidade de armazenamento (por exemplo os registos internos *)
- Um elemento de estado possui, pelo menos, duas entradas:
 - Uma para os **dados** a serem armazenados
 - Outra para o **relógio**, que determina o instante em que os dados são armazenados (interface síncrona)
- Um elemento de estado pode ser lido em qualquer momento
- A saída de um elemento de estado disponibiliza a informação armazenada na última transição ativa do relógio

(*) Na abordagem que se faz a seguir considera-se a memória externa ao CPU como um elemento operativo integrante do *datapath* (elemento de estado)

Implementação de um *Datapath*

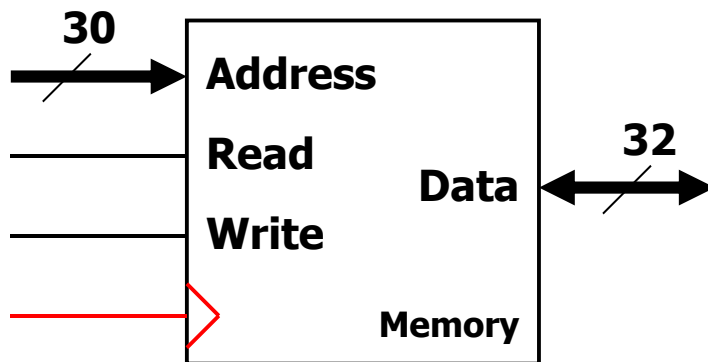
- Para além do sinal de relógio, um elemento de estado pode ainda ter sinais de controlo adicionais:
 - **Um sinal de leitura (read)**, que permite (quando ativo) que a informação armazenada seja disponibilizada na saída (leitura assíncrona)
 - **Um sinal de escrita (write)**, que autoriza (quando ativo) a escrita de informação na próxima transição ativa do relógio (escrita síncrona)
- Se algum destes dois sinais não estiver explicitamente representado, isso significa que a operação respetiva é sempre realizada. No caso da operação de escrita ela é realizada uma vez por ciclo, e coincide com a transição ativa do sinal de relógio

NOTA: Nos slides seguintes, havendo um sinal de relógio comum, e por uma questão de simplificação dos diagramas, o sinal de relógio pode não ser explicitamente representado

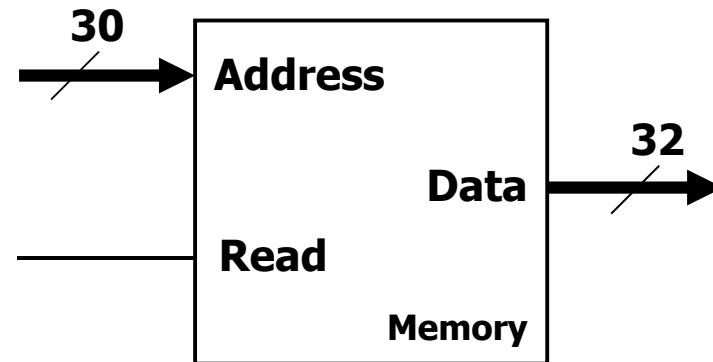
Implementação de um *Datapath*

- Exemplos de representação gráfica de blocos funcionais correspondentes a elementos de estado

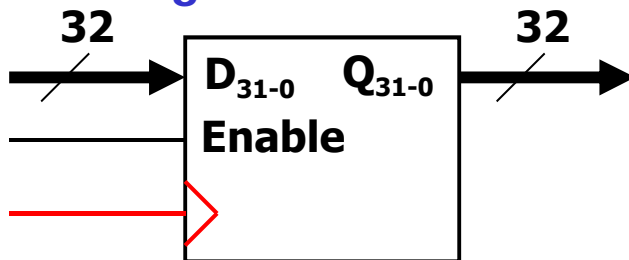
Memória para escrita e leitura (2^{30} words de 32 bits)



Memória apenas para leitura (2^{30} words de 32 bits)



Registro de 32 bits



O sinal “**Read**” pode não existir. Nesse caso a informação de saída estará sempre disponível e corresponderá ao conteúdo da posição de memória especificada na entrada “address”

Implementação de um *Datapath*

- Nos próximos slides faz-se uma abordagem à implementação de um *datapath* capaz de interpretar e executar o seguinte subconjunto de instruções do MIPS:
 - As instruções aritméticas e lógicas (**add, addi, sub, and, or, slt, slti**)
 - Instruções de acesso à memória: load word (**lw**) e store word (**sw**)
 - As instruções de salto condicional (**beq, bne**) e salto incondicional (**j**)
- Como se verá, independentemente da quantidade e tipo de instruções suportadas por uma dada arquitetura, **uma parte importante do trabalho realizado pelo CPU e da infra-estrutura necessária para executar essas instruções é comum a praticamente todas elas**

Implementação de um *Datapath*

- No caso particular do MIPS, para qualquer instrução que compõe o *set* de instruções, **as duas primeiras operações necessárias à sua realização são sempre as mesmas:**
 1. Usar o conteúdo do registro *Program Counter* (PC) para indicar o endereço da memória do qual vai ser lida a próxima instrução e efetuar essa leitura
 2. Ler dois registros internos, usando para isso os índices obtidos nos respectivos campos da instrução (rs e rt):
 - Nas instruções de transferência memória→registro (“lw”) e nas instruções que operam com constantes (immediatos) apenas o conteúdo de um registro é necessário (codificado no campo rs)
 - Em todas as outras é sempre necessário o conteúdo de dois registros (exceto na instrução “jump”)
- **Depois destas operações genéricas, realizam-se as ações específicas para completar a execução da instrução em causa**

Implementação de um *Datapath*

- As ações específicas necessárias para executar as instruções de cada uma das três classes de instruções descritas anteriormente são, em grande parte, semelhantes, independentemente da instrução exata em causa
- Por exemplo, **todas as classes de instruções** (à exceção do salto incondicional) **utilizam a ALU depois da leitura dos registos**:
 - as instruções aritméticas e lógicas para a execução da instrução
 - as instruções de acesso à memória usam a ALU para calcular o endereço de memória
 - a instrução de *branch* para efetuar a subtração que permite determinar se os operandos são iguais ou diferentes
- A execução da instrução de salto incondicional ("**j**") resume-se à alteração incondicional do registo Program Counter (PC) – o novo valor é obtido a partir dos 26 LSB do código máquina da instrução e dos 4 bits mais significativos do valor atual do PC (ver aula 7)

Implementação de um *Datapath*

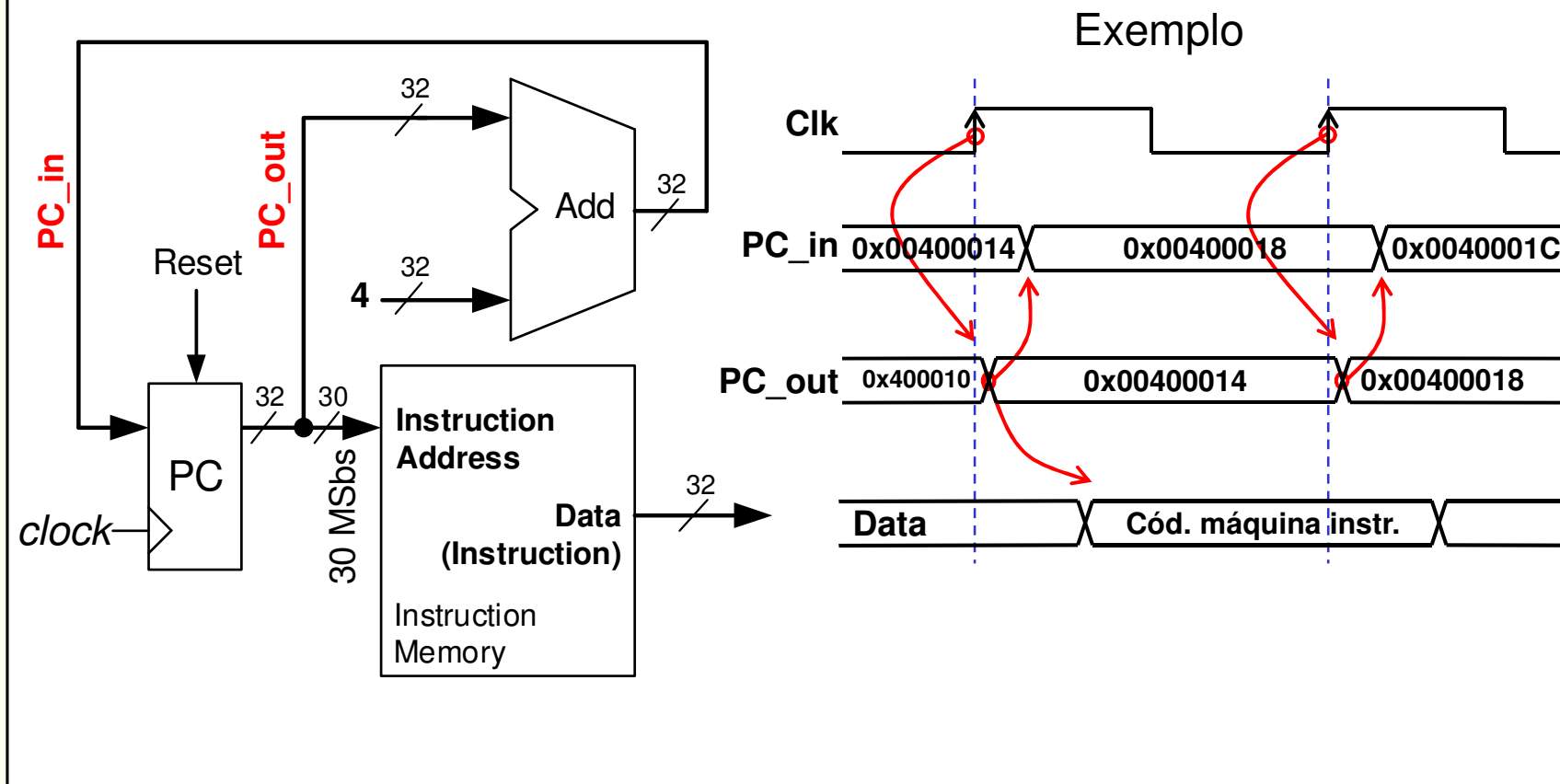
- Depois de utilizar a ALU, as ações que completam as várias classes de instruções diferem:
 - as instruções **aritméticas e lógicas** armazenam o resultado à saída da ALU no registo destino especificado na instrução
 - a instrução **sw** acede à memória para escrita do valor do registo lido anteriormente (codificado no campo rt)
 - a instrução **lw** acede à memória para leitura; o valor lido da memória é, de seguida, escrito no registo destino especificado na instrução (codificado no campo rt)
 - a instrução de **branch** pode ter que alterar o conteúdo do registo Program Counter (i.e. o endereço onde se encontra a próxima instrução a ser executada) no caso de a condição em teste ser verdadeira

Implementação de um *Datapath* – *Instruction Fetch*

- O processo de acesso à memória para leitura da próxima instrução é genericamente designado por ***Instruction Fetch***
- Por uma questão de simplificar a organização da informação, as instruções que compõem um programa são armazenadas sequencialmente na memória:
 - se a instrução ***n*** se encontra armazenada no endereço ***k***, então a instrução ***n+1*** encontra-se armazenada no endereço ***k+x***, em que ***x*** é a dimensão da instrução ***n***, medida em bytes
 - no MIPS, a dimensão das instruções é fixa e igual a 4 bytes; o endereço ***k*** é sempre um **múltiplo de 4**
- **O processo de *Instruction Fetch* deverá, uma vez concluído, deixar o conteúdo do PC pronto para endereçar a próxima instrução**
 - No caso do MIPS, tal corresponde a adicionar a constante 4 ao valor atual do PC

Implementação de um *Datapath* – *Instruction Fetch*

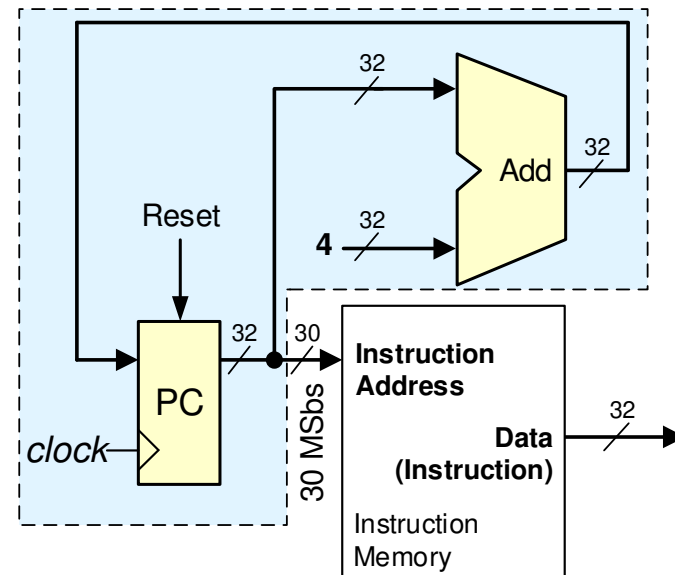
- A parte do *Datapath* necessária à execução de um *Instruction Fetch* toma, assim, a seguinte configuração



Implementação de um *Datapath* – Atualização do PC

```
entity PCupdate is
  port( clk      : in std_logic;
        reset    : in std_logic;
        pc       : out std_logic_vector(31 downto 0));
end PCupdate;
```

```
architecture Behavioral of PCupdate is
  signal s_pc : unsigned(31 downto 0);
begin
  process(clk)
  begin
    if(rising_edge(clk)) then
      if(reset = '1') then
        s_pc <= (others => '0');
      else
        s_pc <= s_pc + 4;
      end if;
    end if;
  end process;
  pc <= std_logic_vector(s_pc);
end Behavioral;
```



Implementação de um *Datapath* – *Instruction Memory*

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

entity instructionMemory is
    generic (ADDR_BUS_SIZE : positive := 6);
    port ( address    : in  std_logic_vector (ADDR_BUS_SIZE-1 downto 0);
          readData    : out std_logic_vector (31 downto 0));
end instructionMemory;

architecture Behavioral of instructionMemory is
    constant NUM_WORDS : positive := (2 ** ADDR_BUS_SIZE );
    subtype TData is std_logic_vector (31 downto 0);
    type TMemory is array (0 to NUM_WORDS - 1) of TData;
    constant s_memory : TMemory := (X"8C010000",  -- lw    $1,0($0)
                                     X"20210004",  -- addi  $1,$1,4
                                     X"AC010004",  -- sw    $1,4($0)
                                     others => X"00000000");

begin
    readData <= s_memory(to_integer(unsigned(address)));
end Behavioral;
```

Implementação de um *Datapath*

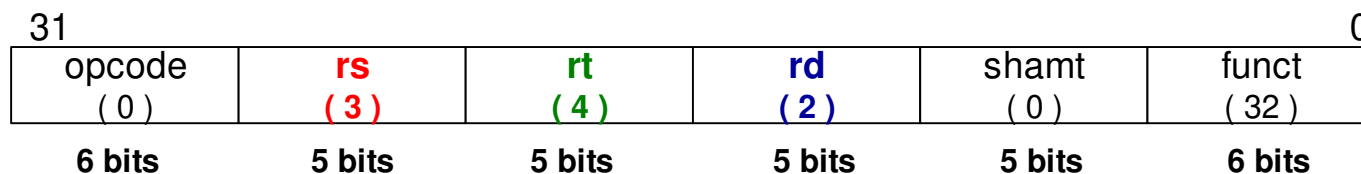
- Que outros elementos operativos básicos serão necessários para suportar a execução das várias classes de instruções que estamos a considerar?
 - Instruções aritméticas e lógicas
 - Tipo R: **add**, **sub**, **and**, **or**, **slt**
 - Tipo I: **addi**, **slti**
 - Instruções de leitura e escrita da memória (Tipo I: **lw**, **sw**)
 - Instruções de salto condicional (Tipo I: **beq**, **bne**)

Na análise que se segue, não se explicita a Unidade de Controlo. Esta unidade é responsável pela geração dos sinais de controlo que asseguram a coordenação dos elementos do *datapath* durante a execução de uma instrução

Implementação de um *Datapath* – instruções tipo R

- Operações realizadas na execução de uma instrução do tipo R:
 - **Instruction Fetch** (leitura da instrução, cálculo de PC+4)
 - **Leitura dos registos** operando (registos especificados nos campos “rs” e “rt” da instrução)
 - **Realização da operação** na ALU (especificada no campo “funct”)
 - **Escrita do resultado** no registo destino (especificado no campo “rd”)

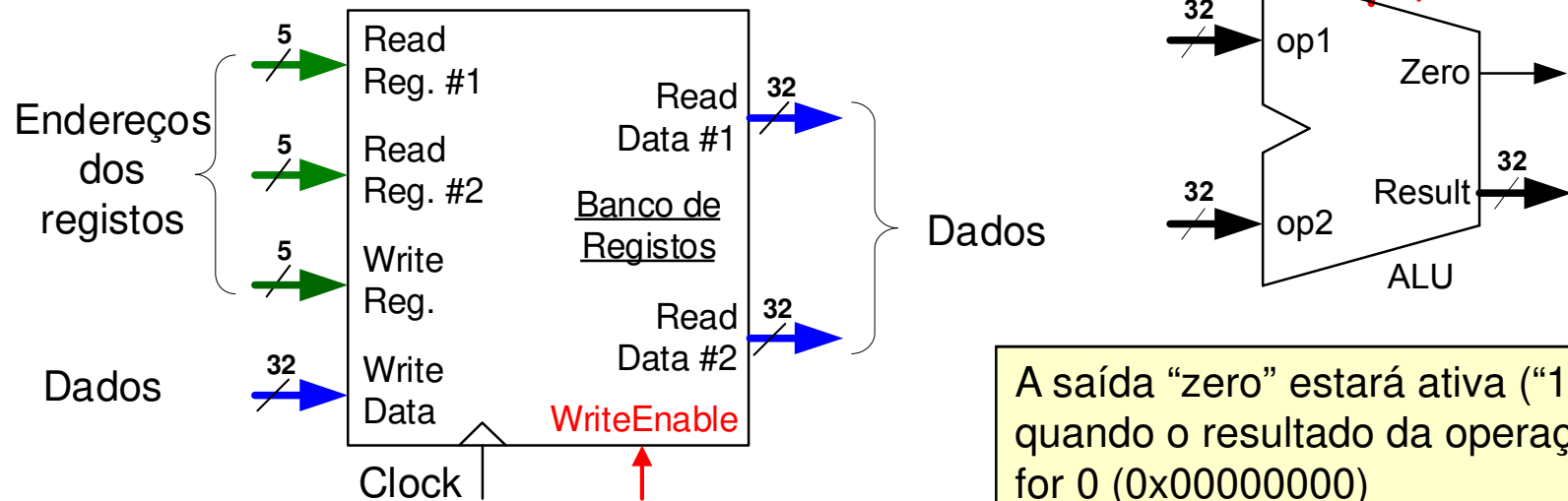
Exemplo: **add** \$2, \$3, \$4



Código máquina: 0x00641020

Implementação de um *Datapath* – instruções tipo R

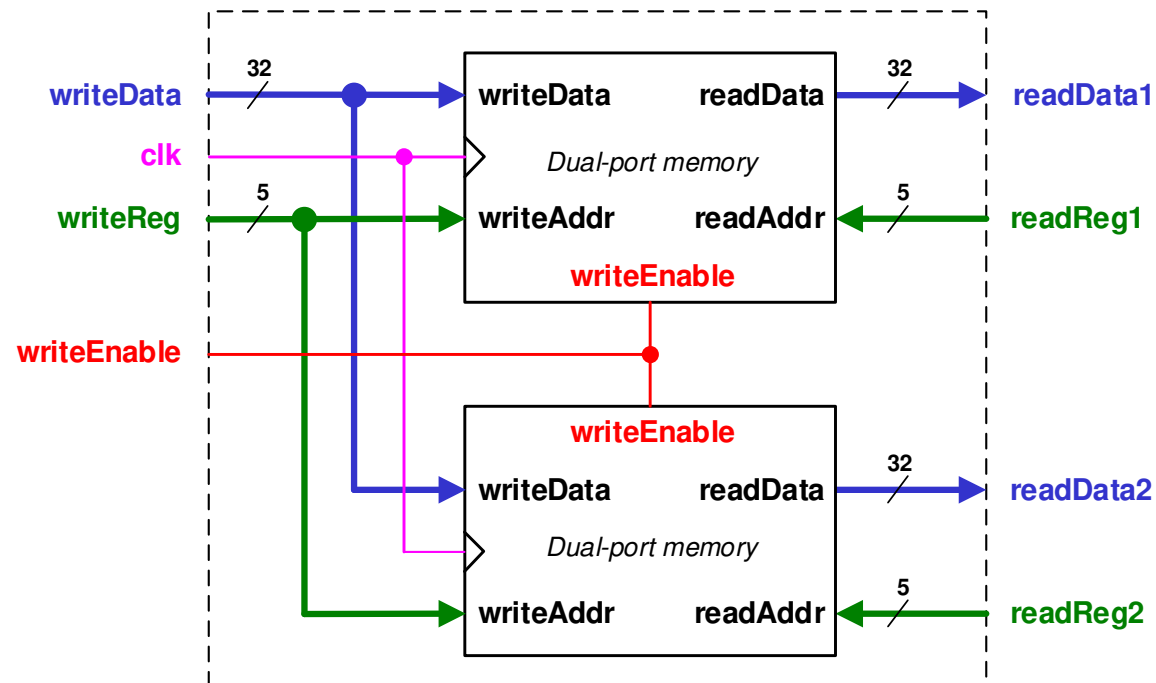
- Os elementos necessários à execução das instruções aritméticas e lógicas (tipo R) são:
 - Uma ALU de 32 bits
 - Um conjunto de registros internos (Banco de registros com 32 registros de 32 bits cada)



- 1 porto de escrita síncrona
- 2 portos de leitura assíncrona

Banco de Registos

- O banco de registos pode ser implementado com duas memórias de duplo porto (um porto de escrita e um porto de leitura):



- o porto de escrita do banco de registos é comum às duas memórias (i.e. a escrita é feita simultaneamente nas duas memórias)
- cada memória fornece um porto de leitura independente

Banco de registros (dual-port memory) – VHDL

```
entity DP_Memory is
  generic (WORD_BITS  : integer range 1 to 128 := 32;
          ADDR_BITS   : integer range 1 to 10  := 5);
  port (
    clk      : in  std_logic;
    -- asynchronous read port
    readAddr  : in  std_logic_vector (ADDR_BITS-1 downto 0);
    readData  : out std_logic_vector (WORD_BITS-1 downto 0);

    -- synchronous write port
    writeAddr  : in  std_logic_vector (ADDR_BITS-1 downto 0);
    writeData  : in  std_logic_vector (WORD_BITS-1 downto 0);
    writeEnable : in  std_logic);
end DP_Memory;
```

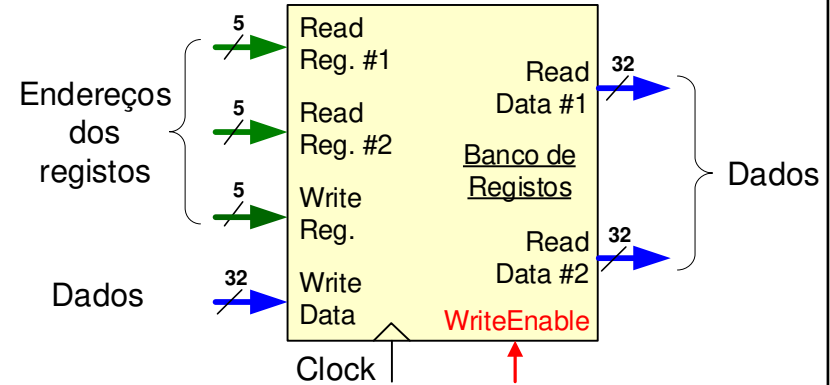
Banco de registros (dual-port memory) – VHDL

```
architecture Behavioral of DP_Memory is
    subtype TDataWord is std_logic_vector(WORD_BITS-1 downto 0);
    type TMem is array (0 to 2**ADDR_BITS-1) of TDataWord;
    signal s_memory : TMem := (others => (others => '0'));
begin
    process(clk, writeEnable) is
    begin
        if(rising_edge(clk) ) then
            if(writeEnable = '1') then
                s_memory(to_integer(unsigned(writeAddr))) <= writeData;
            end if;
        end if;
    end process;
    readData <= (others => '0') when
        (to_integer(unsigned(readAddr)) = 0) else
        s_memory(to_integer(unsigned(readAddr)));
end Behavioral;
```


Banco de registros – VHDL

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

```
entity RegFile is  
  port (clk          : in  std_logic;  
        writeEnable  : in  std_logic;  
        writeReg     : in  std_logic_vector( 4 downto 0 );  
        writeData    : in  std_logic_vector(31 downto 0 );  
        readReg1     : in  std_logic_vector( 4 downto 0 );  
        readReg2     : in  std_logic_vector( 4 downto 0 );  
        readData1    : out std_logic_vector(31 downto 0 );  
        readData2    : out std_logic_vector(31 downto 0 ));  
end RegFile;
```



Banco de registros – VHDL

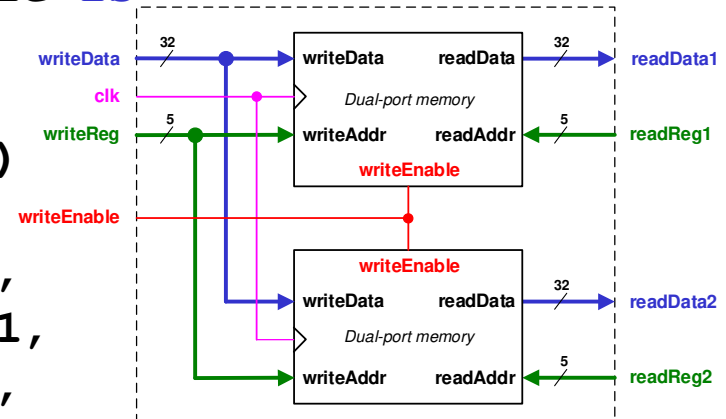
```
architecture Structural of RegFile is
begin
```

```
rs_mem:
```

```
entity work.DP_Memory(Behavioral)
    port map(clk      => clk,
             readAddr  => readReg1,
             readData  => readData1,
             writeAddr  => writeReg,
             writeData  => writeData,
             writeEnable => writeEnable);
```

```
rt_mem:
```

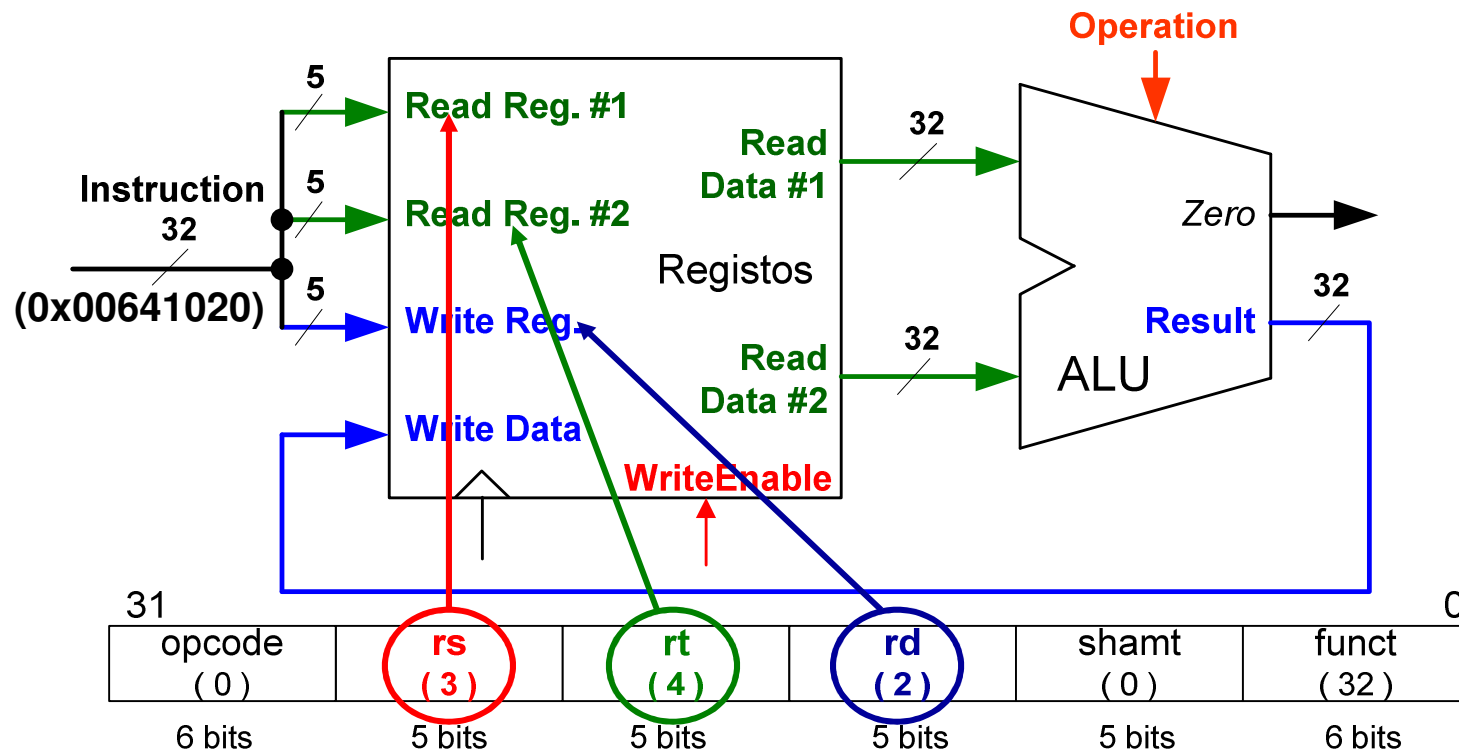
```
entity work.DP_Memory(Behavioral)
    port map(clk      => clk,
             readAddr  => readReg2,
             readData  => readData2,
             writeAddr  => writeReg,
             writeData  => writeData,
             writeEnable => writeEnable);
end Structural;
```



Implementação de um *Datapath* – instruções tipo R

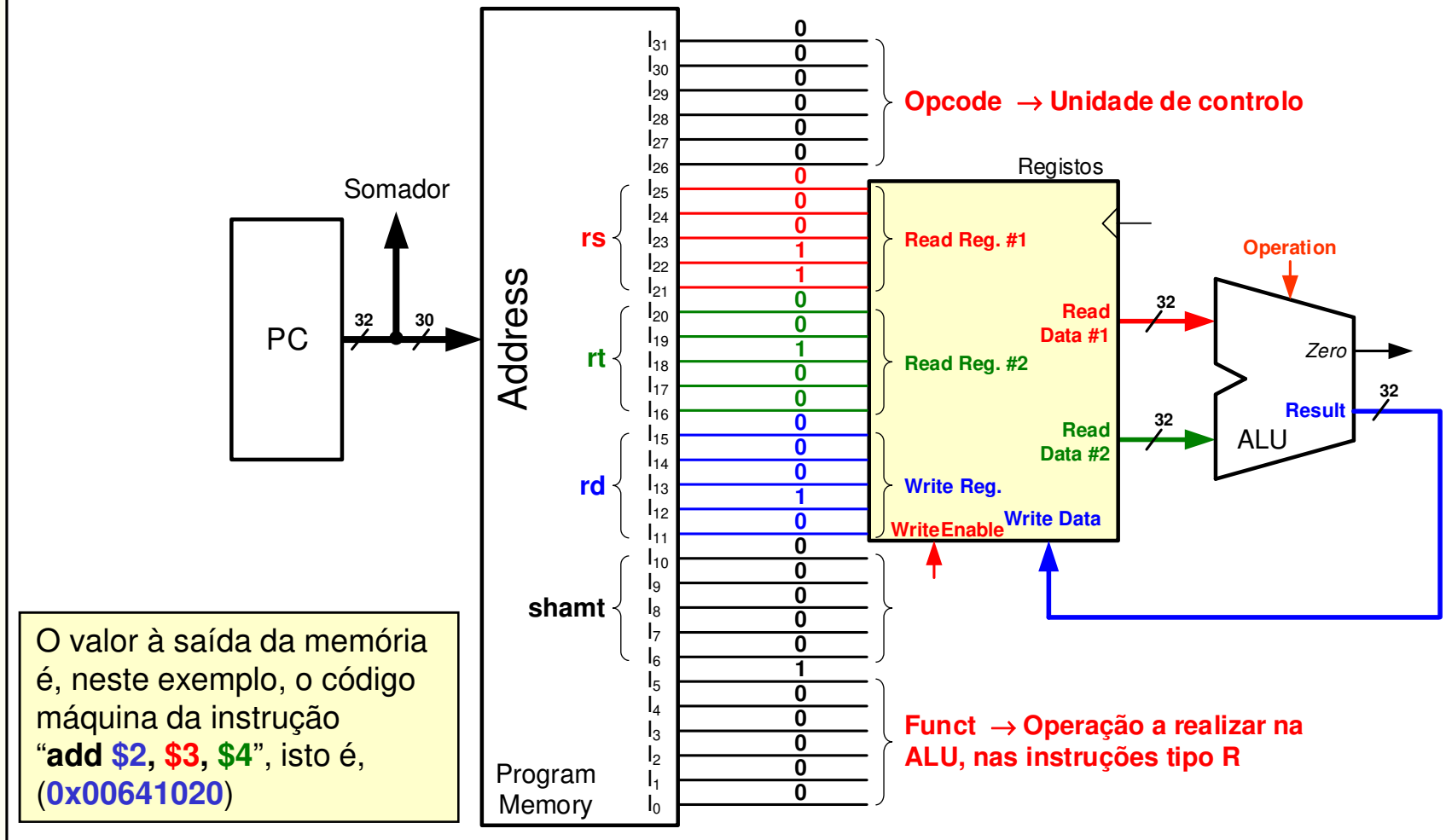
- A interligação dos elementos operativos será:

Exemplo: **add** \$2, \$3, \$4



Implementação de um *Datapath* – instruções tipo R

- Ligação entre a memória de código e o Banco de Registos (Instruções tipo R)



Módulo para separação dos campos da instrução – VHDL

```
entity InstrSplitter is
  port( instruction : in  std_logic_vector(31 downto 0);
        opcode      : out std_logic_vector(5  downto 0);
        rs          : out std_logic_vector(4  downto 0);
        rt          : out std_logic_vector(4  downto 0);
        rd          : out std_logic_vector(4  downto 0);
        shamt       : out std_logic_vector(4  downto 0);
        funct       : out std_logic_vector(5  downto 0);
        imm         : out std_logic_vector(15 downto 0);
        jAddr       : out std_logic_vector(25 downto 0));
end InstrSplitter;
architecture Behavioral of InstrSplitter is
begin
  opcode <= instruction(31 downto 26);
  rs     <= instruction(25 downto 21);
  rt     <= instruction(20 downto 16);
  rd     <= instruction(15 downto 11);
  shamt  <= instruction(10 downto  6);
  funct  <= instruction( 5 downto  0);
  imm    <= instruction(15 downto  0);
  jAddr  <= instruction(25 downto  0);
end Behavioral;
```

Implementação de um *Datapath* (Instrução SW)

- Operações realizadas na execução de uma instrução “**sw**”:
 - *Instruction Fetch* (leitura da instrução, cálculo de PC+4)
 - Leitura dos registos que contêm o **endereço-base** e o **valor a transferir** (registos especificados nos campos “**rs**” e “**rt**” da instrução, respetivamente)
 - Cálculo, na ALU, do endereço de acesso (soma algébrica entre o conteúdo do registo “**rs**” e o **offset** especificado na instrução)
 - Escrita na memória

Exemplo: **sw** \$2, 0x24(\$4)

Endereço inicial da memória onde vai ser escrita a word de 32 bits armazenada no registo \$2

opcode (43)	rs (4)	rt (2)	offset (0x24)
------------------	--------------------	--------------------	---------------------------

Implementação de um *Datapath* (Instrução LW)

- Operações realizadas na execução de uma instrução “lw”
 - *Instruction Fetch* (leitura da instrução, cálculo de PC+4)
 - Leitura do registo que contém o endereço base (registo especificado no campo “rs” da instrução)
 - Cálculo, na ALU, do endereço de acesso (soma algébrica entre o conteúdo do registo “rs” e o **offset** especificado na instrução)
 - Leitura da memória
 - Escrita do valor lido da memória no registo destino (especificado no campo “rt” da instrução)

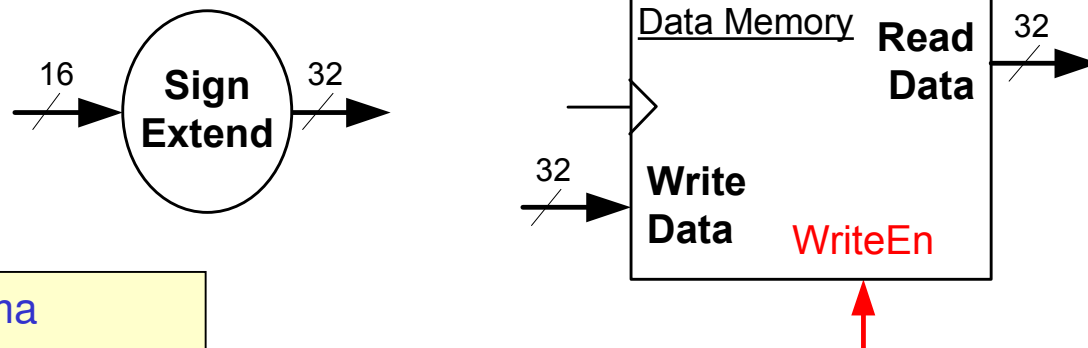
Exemplo: lw \$4, 0x2F(\$15)

Endereço inicial da memória para leitura de uma word de 32 bits (vai ser escrita no registo \$4)

opcode (35)	rs (15)	rt (4)	offset (0x2F)
------------------	--------------	-------------	--------------------

Implementação de um *Datapath* (Instruções lw e sw)

- Os elementos necessários à execução das instruções de transferência de informação entre registros e memória (*load* e *store*) são, para além da ALU e do Banco de Registos:
 - A memória externa (de dados)
 - Um extensor de sinal

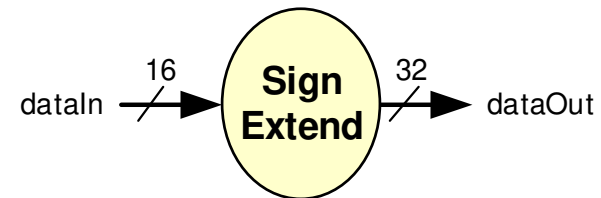


O **extensor de sinal** cria uma constante de 32 bits em complemento para 2, a partir dos 16 bits menos significativos da instrução (o bit 15 é replicado nos 16 mais significativos da constante de saída)

Por uma questão de conveniência de desenho dos diagramas, o barramento de dados da memória (bidirecional) está separado em dados para escrita e dados de leitura

Módulo de extensão de sinal – VHDL

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

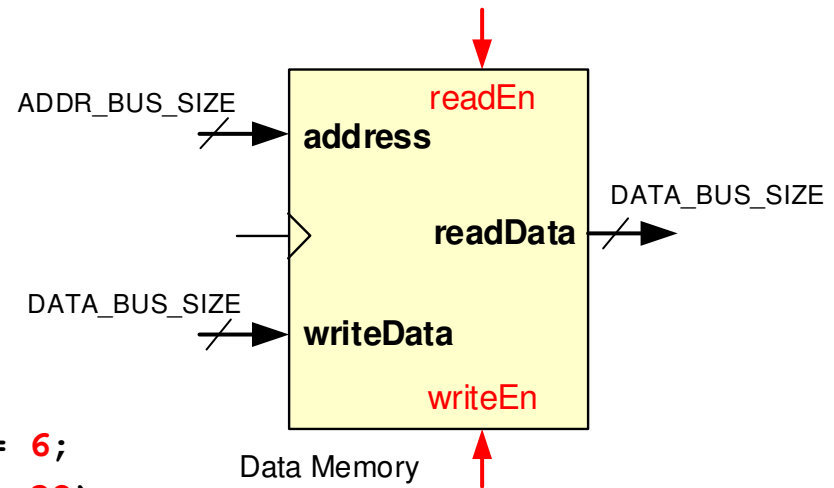


```
entity SignExtend is  
    port (dataIn  : in  std_logic_vector(15 downto 0);  
          dataOut : out std_logic_vector(31 downto 0));  
end SignExtend;
```

```
architecture Behavioral of SignExtend is  
begin  
    dataOut(31 downto 16) <= (others => dataIn(15));  
    dataOut(15 downto 0)  <= dataIn;  
end Behavioral;
```

Módulo de memória RAM – VHDL

```
entity RAM is
  generic( ADDR_BUS_SIZE : positive := 6;
           DATA_BUS_SIZE : positive := 32);
  port (clk      : in  std_logic;
        readEn   : in  std_logic;
        writeEn  : in  std_logic;
        address   : in  std_logic_vector(ADDR_BUS_SIZE-1 downto 0);
        writeData : in  std_logic_vector(DATA_BUS_SIZE-1 downto 0);
        readData  : out std_logic_vector(DATA_BUS_SIZE-1 downto 0));
end RAM;
```



Módulo de memória RAM – VHDL

```
architecture Behavioral of RAM is
    constant NUM_WORDS : positive := (2 ** ADDR_BUS_SIZE );
    subtype TData is std_logic_vector(DATA_BUS_SIZE-1 downto 0);
    type TMemory is array(0 to NUM_WORDS - 1) of TData;
    signal s_memory : TMemory;
begin

    process(clk)
    begin
        if(rising_edge(clk)) then
            if(writeEn = '1') then
                s_memory(to_integer(unsigned(address))) <= writeData;
            end if;
        end if;
    end process;

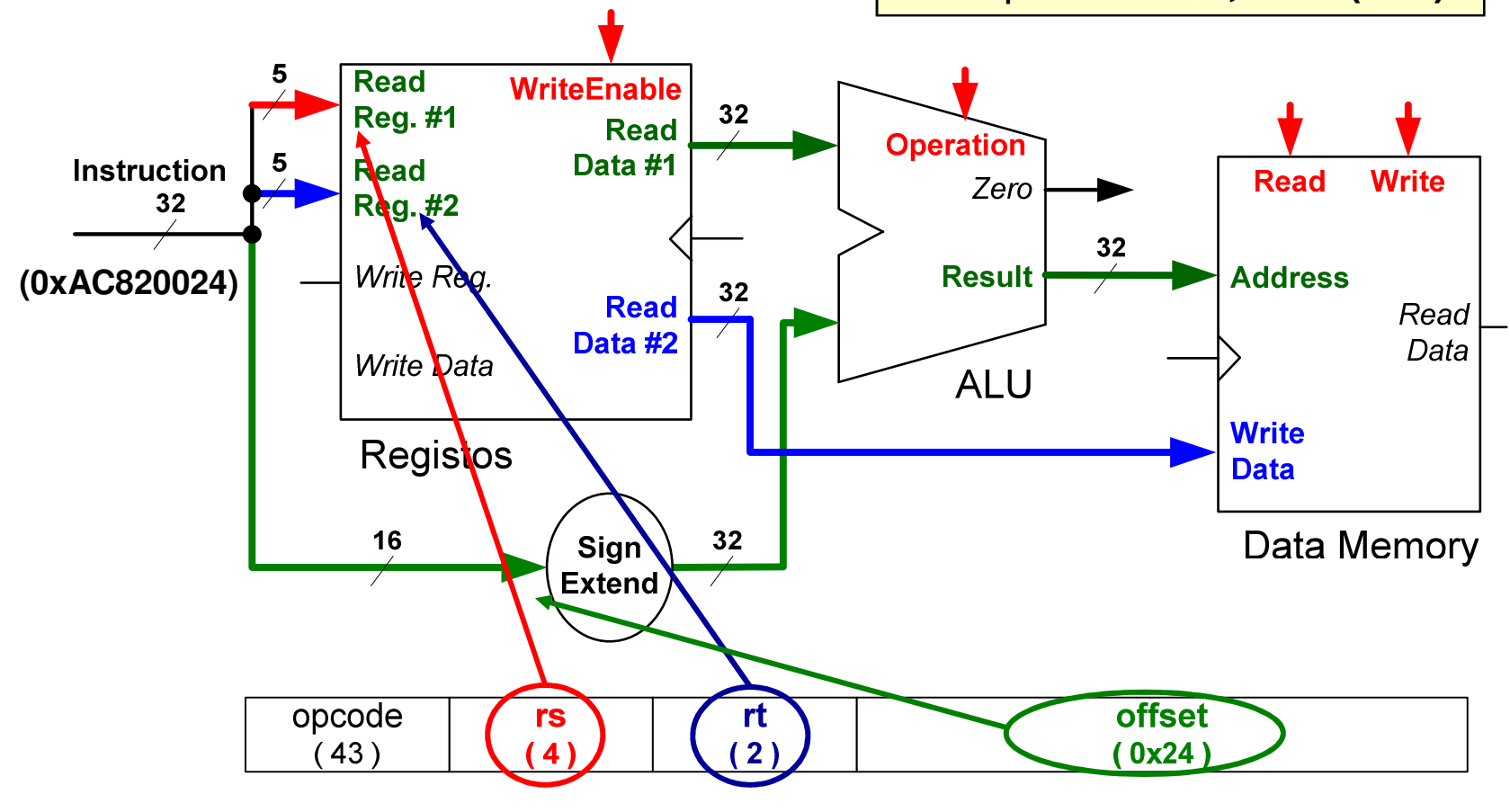
    readData <= s_memory(to_integer(unsigned(address))) when
        readEn = '1' else (others => '-');

end Behavioral;
```

Implementação de um *Datapath* (Instruções lw e sw)

- A interligação dos elementos operativos necessários à execução do “**sw**” será:

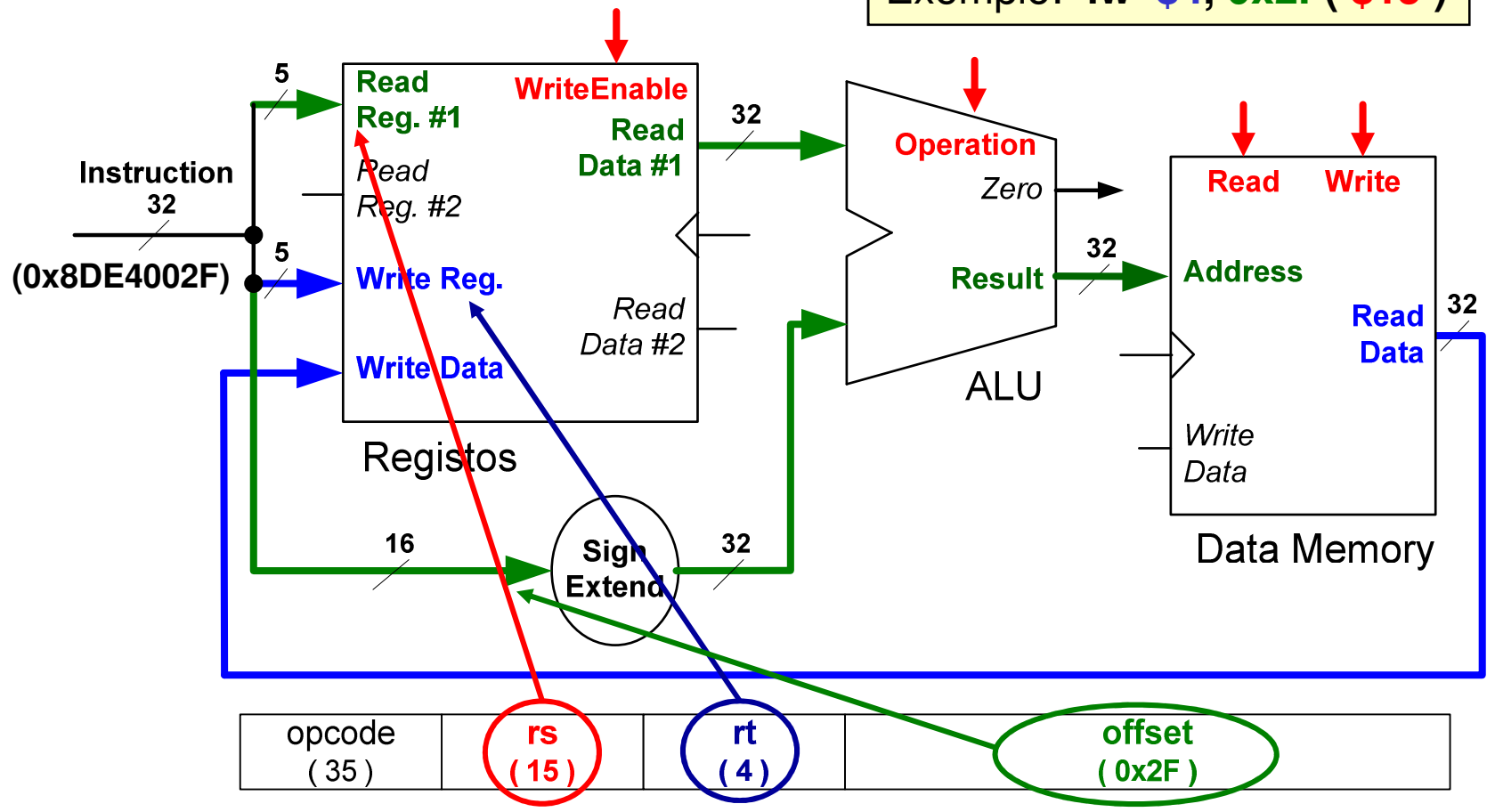
Exemplo: **sw** \$2, 0x24(\$4)



Implementação de um *Datapath* (Instruções lw e sw)

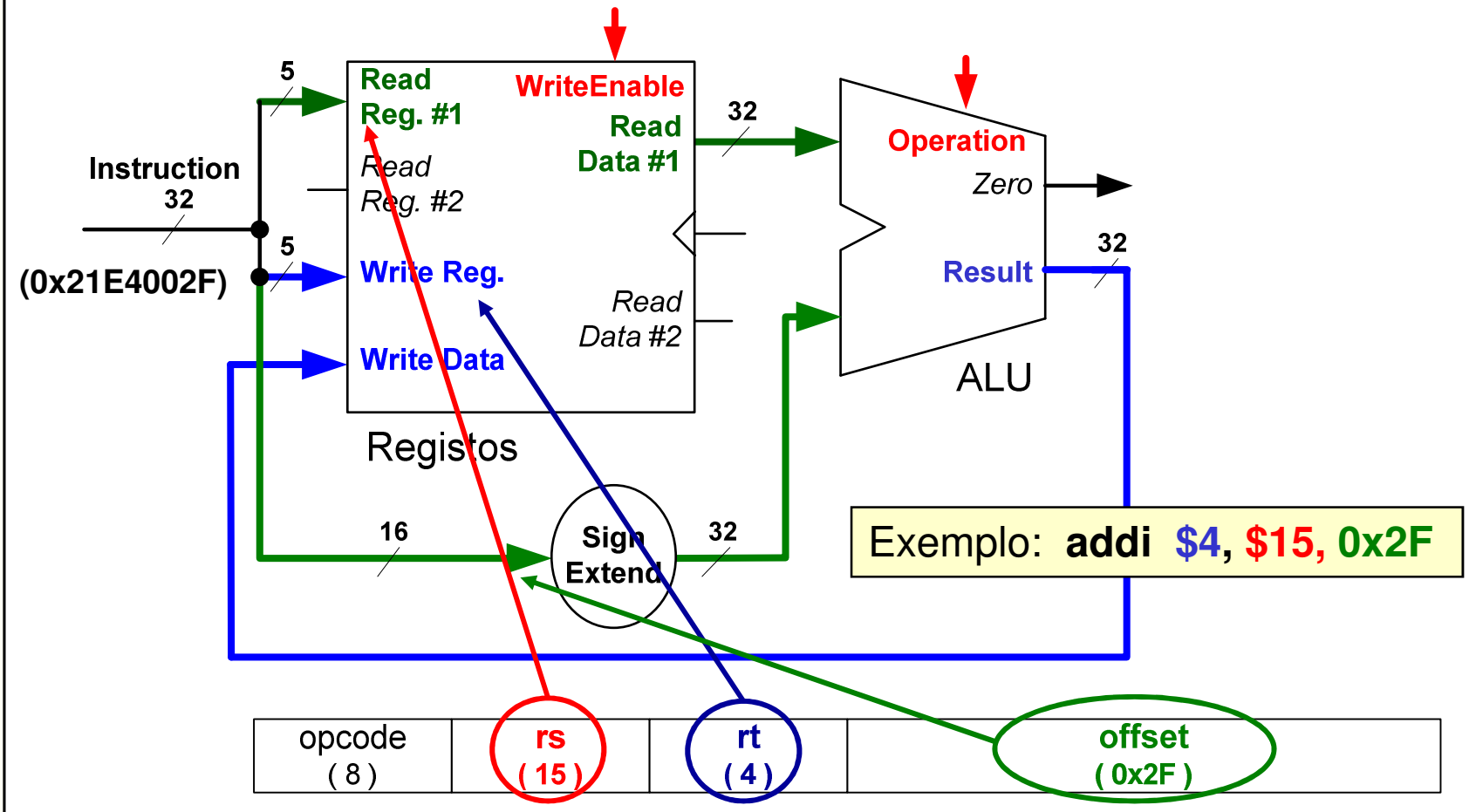
- A interligação dos elementos operativos necessários à execução do “lw” será:

Exemplo: lw \$4, 0x2F(\$15)



Implementação de um *Datapath* (Instruções “imediatas”)

- A interligação dos elementos operativos necessários à execução de instruções que operam com constantes (“**addi**”, “**slti**”) será:



Implementação de um *Datapath* (Instruções de *branch*)

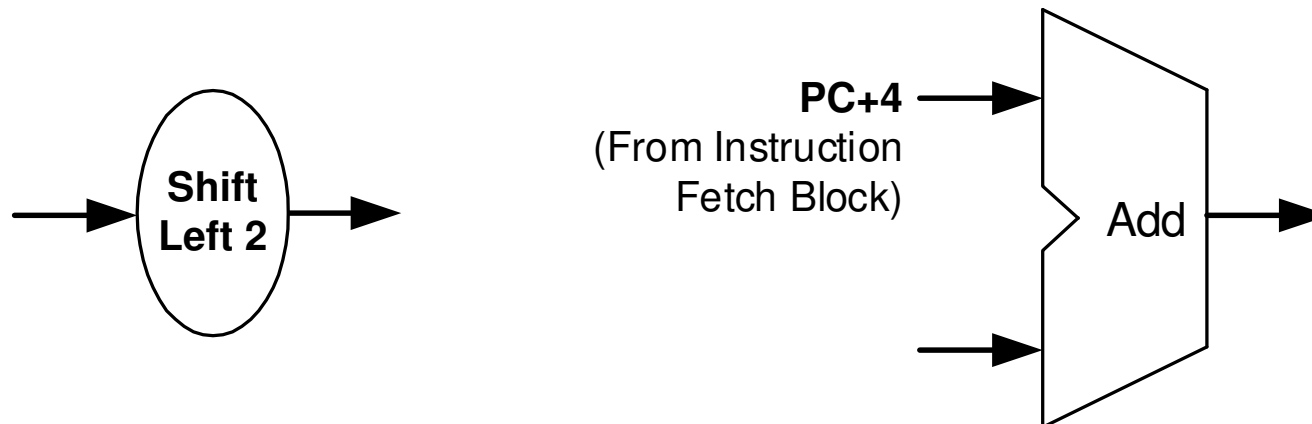
- Operações realizadas na execução de uma instrução de *branch*:
 - *Instruction Fetch* (leitura da instrução, cálculo de PC+4)
 - Leitura dos registos a comparar
 - Comparação dos valores dos registos (realização de uma operação de subtração na ALU)
 - Cálculo do endereço-alvo da instrução de *branch*
(*Branch Target Address* - BTA) - ver aula 7
$$\text{BTA} = (\text{PC} + 4) + (\text{instruction_offset} * 4)$$
 - Alteração do valor do registo PC:
 - se a condição testada pelo *branch* for verdadeira PC = BTA
 - se a condição testada pelo *branch* for falsa PC = PC + 4

Exemplo: **beq** \$2, \$3, 0x20

opcode (4)	rs (2)	rt (3)	instruction_offset (0x20)
-----------------	-------------	-------------	--------------------------------

Implementação de um *Datapath* (Instruções de branch)

- Finalmente, os elementos necessários à execução das instruções de salto condicional implicam a inclusão dos seguintes elementos:
 - *left shifter* (2 bits)
 - um somador



O *left shifter* recupera os 2 bits menos significativos do *instruction offset* que são desprezados no momento da codificação da instrução (ver aula 7)

Módulo "left shifter" – VHDL

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

```
entity LeftShifter2 is
```

```
    port (dataIn : in  std_logic_vector(31 downto 0);
```

```
          dataOut: out std_logic_vector(31 downto 0));
```

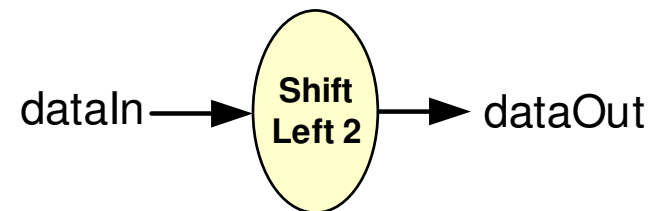
```
end LeftShifter2;
```

```
architecture Behavioral of LeftShifter2 is
```

```
begin
```

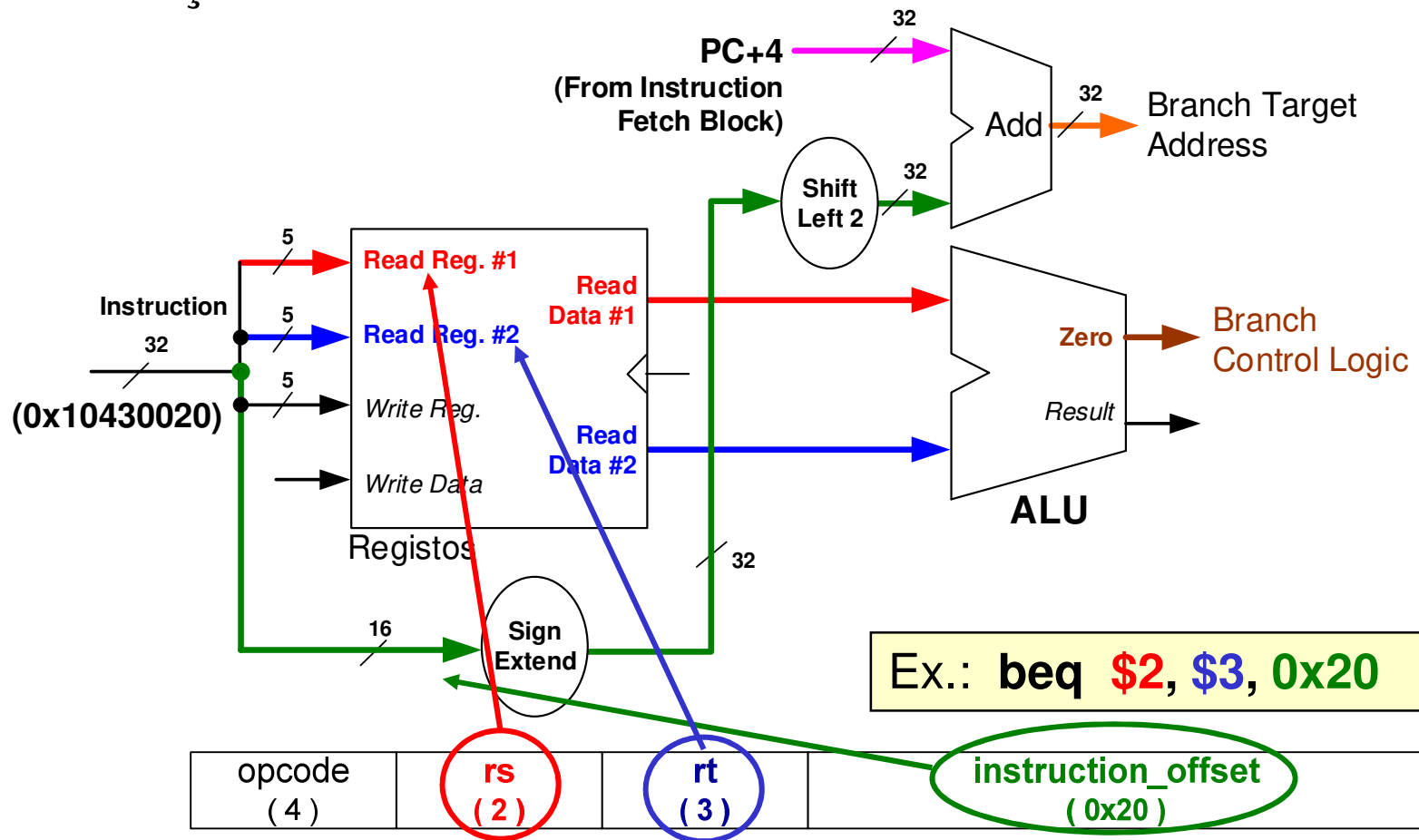
```
    dataOut <= dataIn(29 downto 0) & "00";
```

```
end Behavioral;
```



Implementação de um *Datapath* (Instruções de *branch*)

- Interligação dos elementos operativos necessários à execução de uma instrução de *branch*:

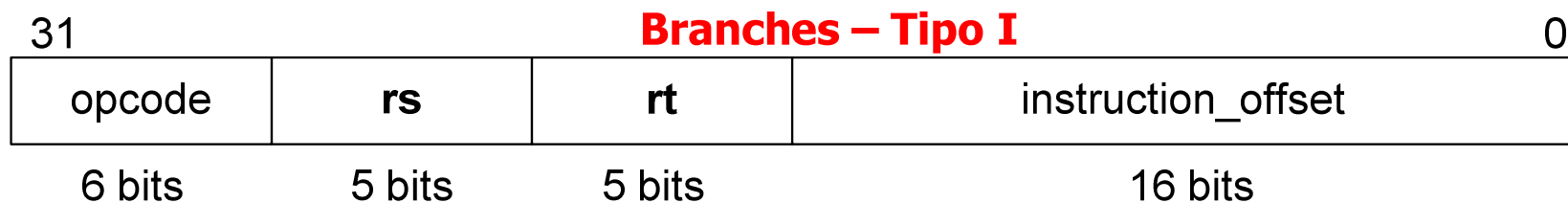
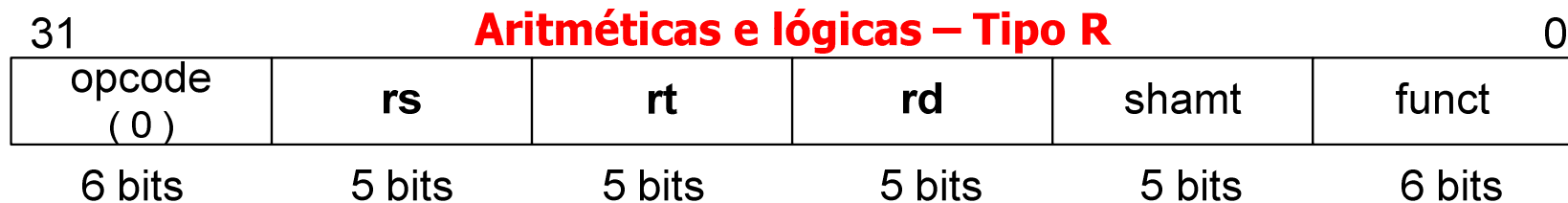


Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- Nos slides anteriores identificaram-se, separadamente, os blocos básicos constituintes do *Datapath* necessários à execução dos vários tipos de instruções
- **Como juntar e interligar os diversos blocos, por forma a servir todas as instruções?**
 - Identificação dos blocos que podem ser partilhados pelos vários tipos de instruções
 - Desenvolvimento de uma estratégia que permita que os mesmos possam ser “configurados” para cada caso
- (o suporte para a instrução J (jump) será introduzido mais tarde)

Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- Relembremos o formato de codificação dos três tipos de instruções:

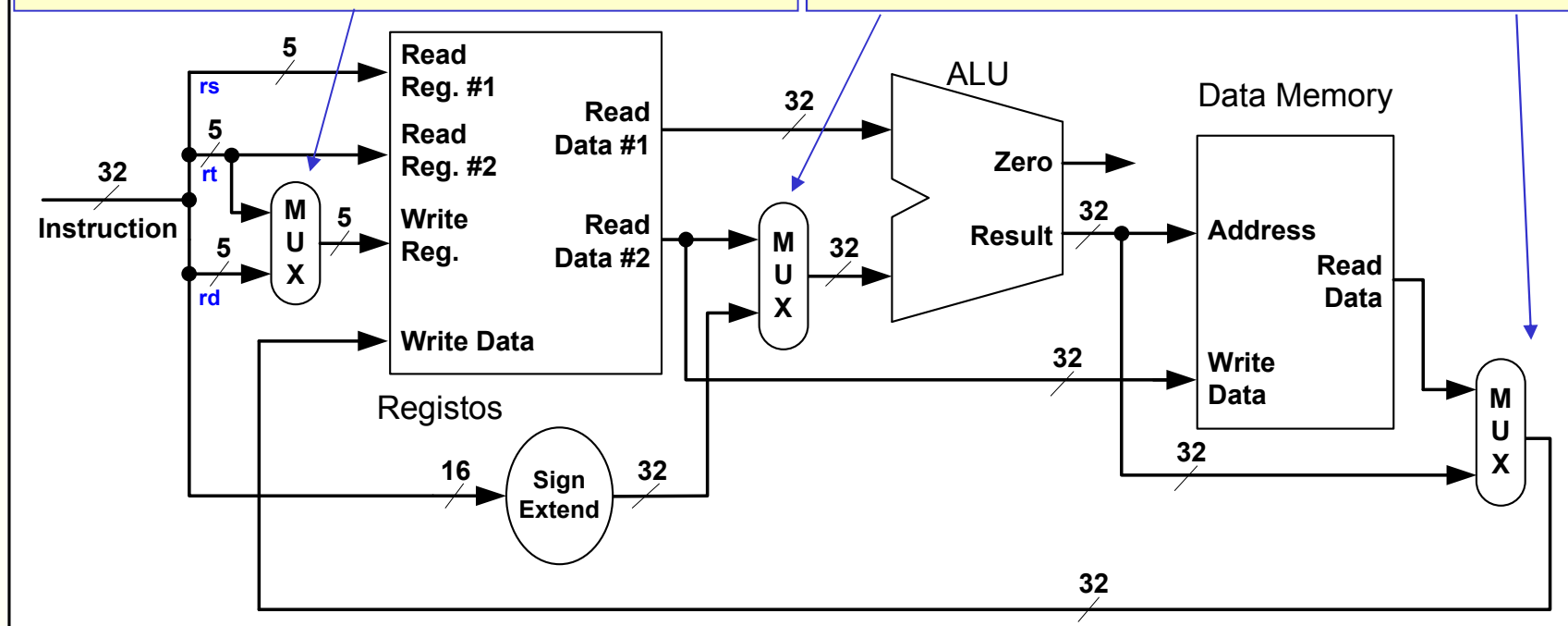


Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- **1º passo:** combinação das instruções de acesso à memória com as instruções aritméticas e lógicas do tipo R e do tipo I:

Escolha do registo destino (3º campo nas instruções tipo R, 2º na instrução LW e nas aritméticas e lógicas imediatas)

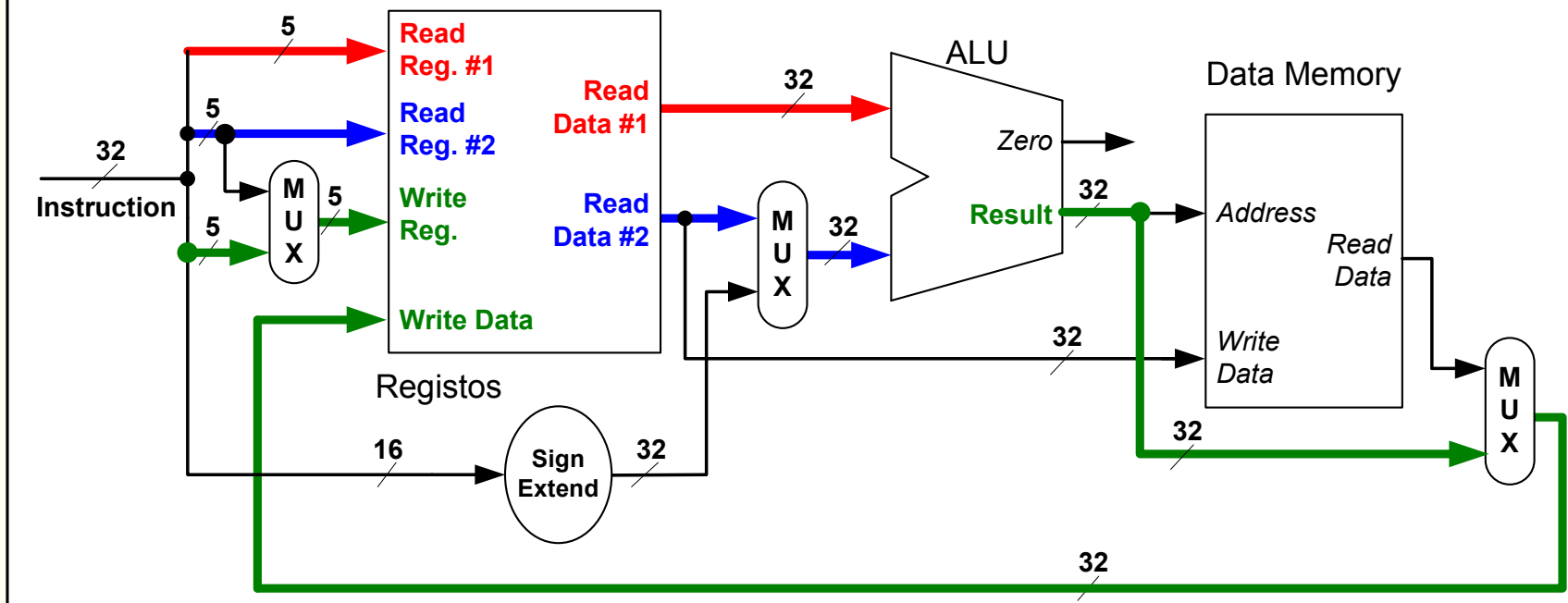
Multiplexers para adequar os recursos às necessidades (encaminhamento)



Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- Fluxo da informação na execução de uma instrução do tipo R. Exemplo: **add \$2, \$3, \$4**

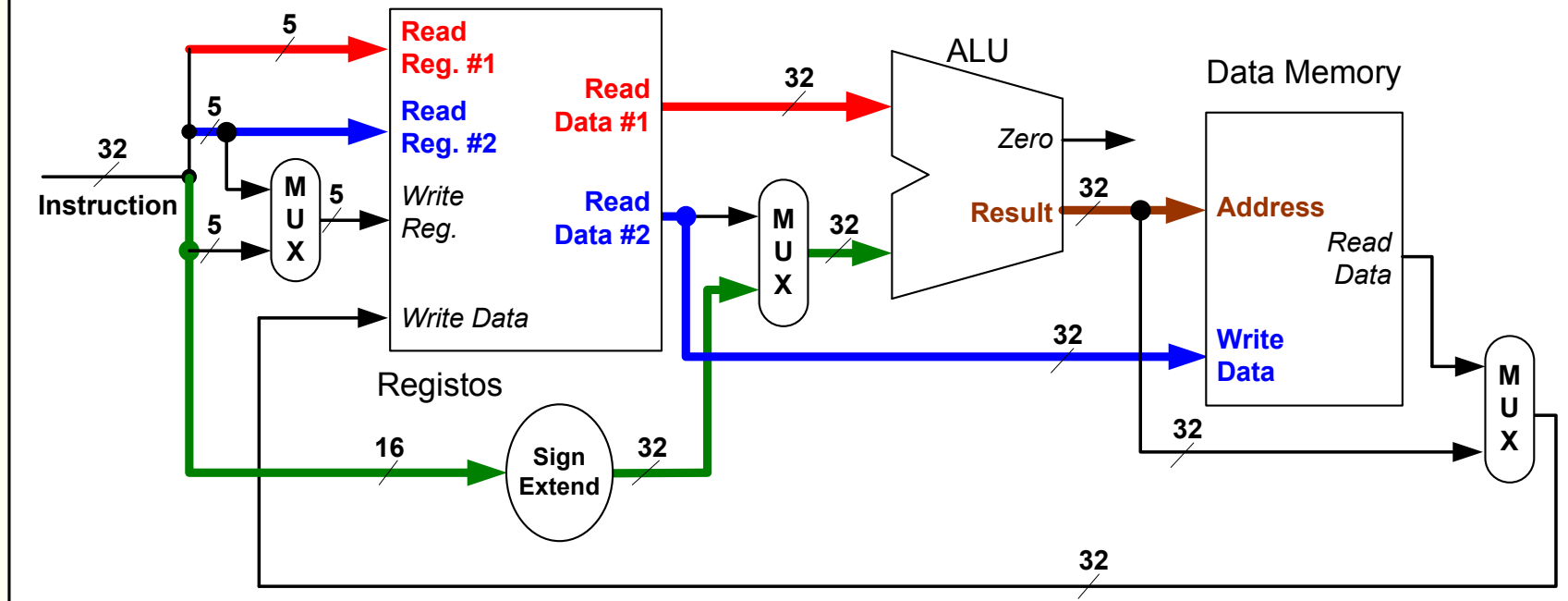
opcode (0)	rs (3)	rt (4)	rd (2)	shamt (0)	funct (32)
-----------------	-------------	-------------	-------------	----------------	-----------------



Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- Fluxo da informação na execução de uma instrução SW (*store word*). Exemplo: **sw \$2, 0x24 (\$4)**

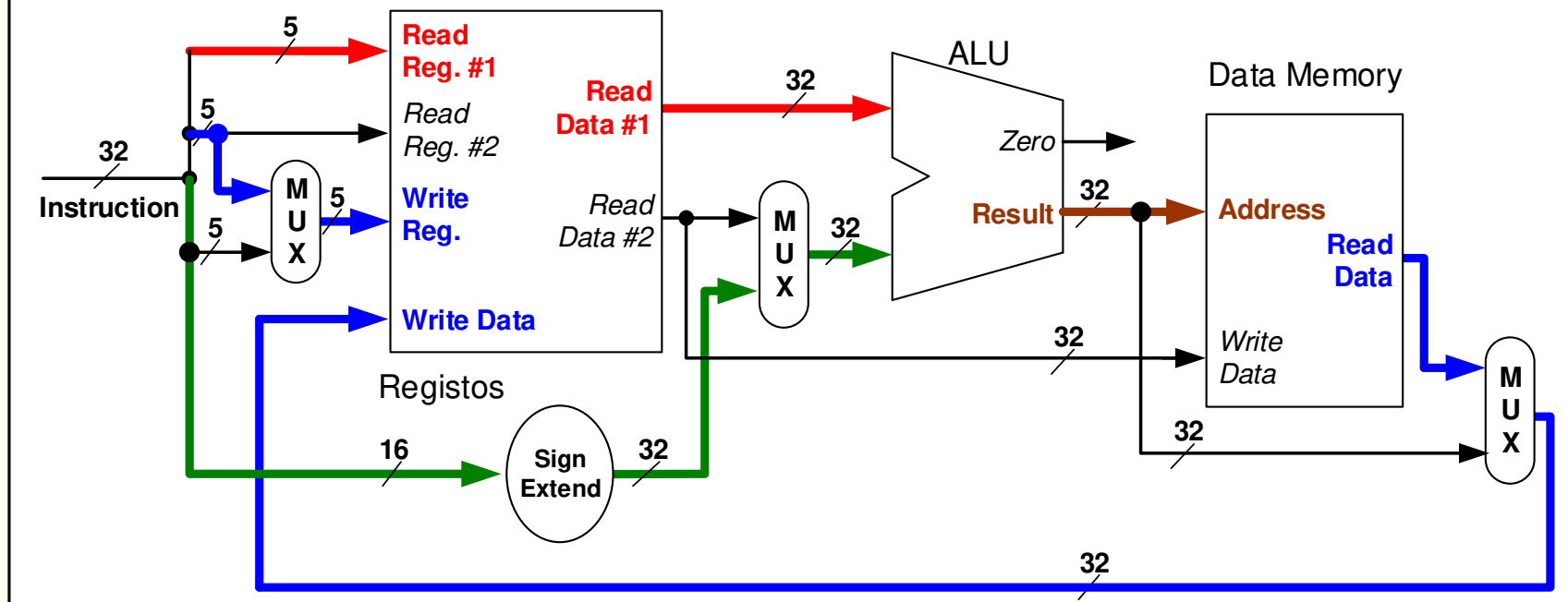
opcode (43)	rs (4)	rt (2)	offset (0x24)
------------------	-------------	-------------	--------------------



Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- Fluxo da informação na execução de uma instrução LW (*load word*). Exemplo: `lw $4, 0x2F($15)`

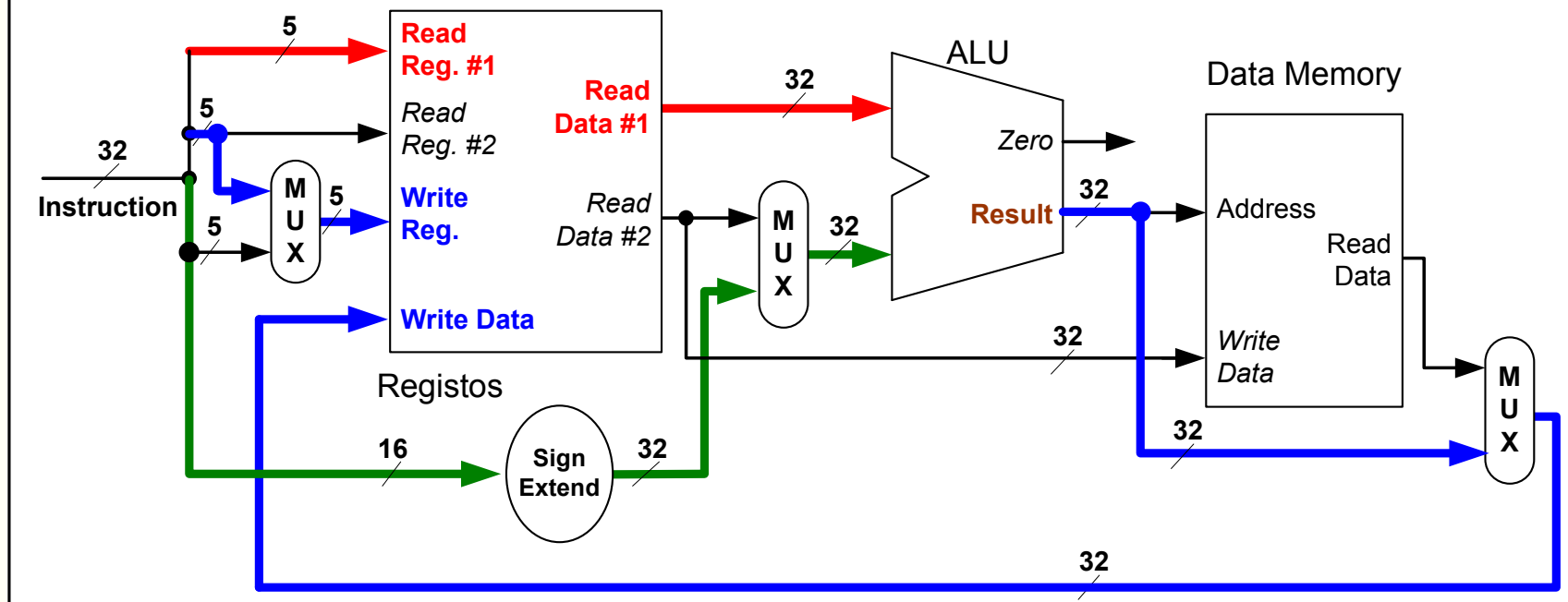
opcode (35)	rs (15)	rt (4)	offset (0x2F)
------------------	--------------	-------------	--------------------



Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

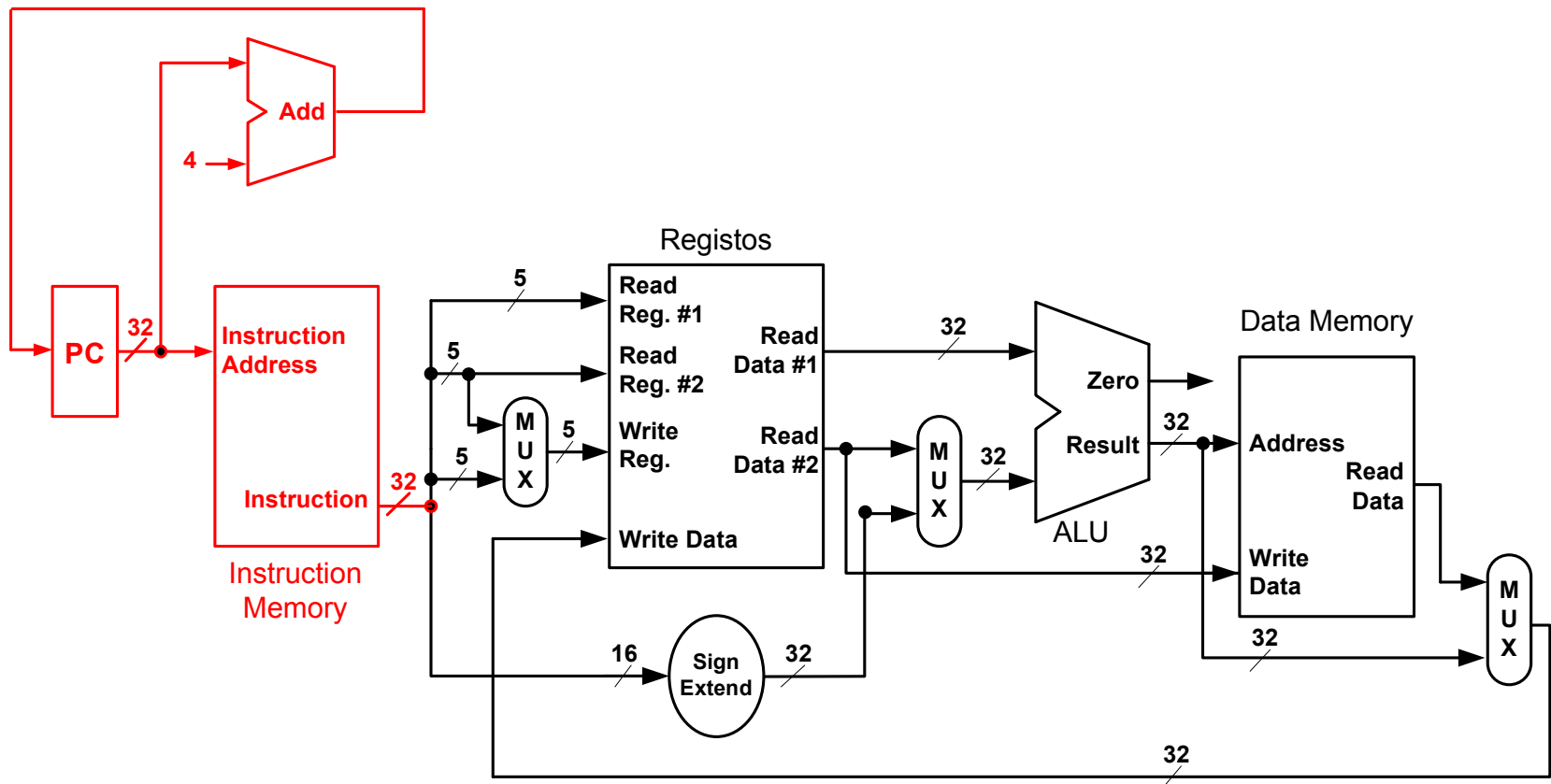
- Fluxo da informação na execução de uma instrução aritmética imediata. Exemplo: **addi \$4, \$15, 0x2F**

opcode (8)	rs (15)	rt (4)	offset (0x2F)
-----------------	--------------	-------------	--------------------



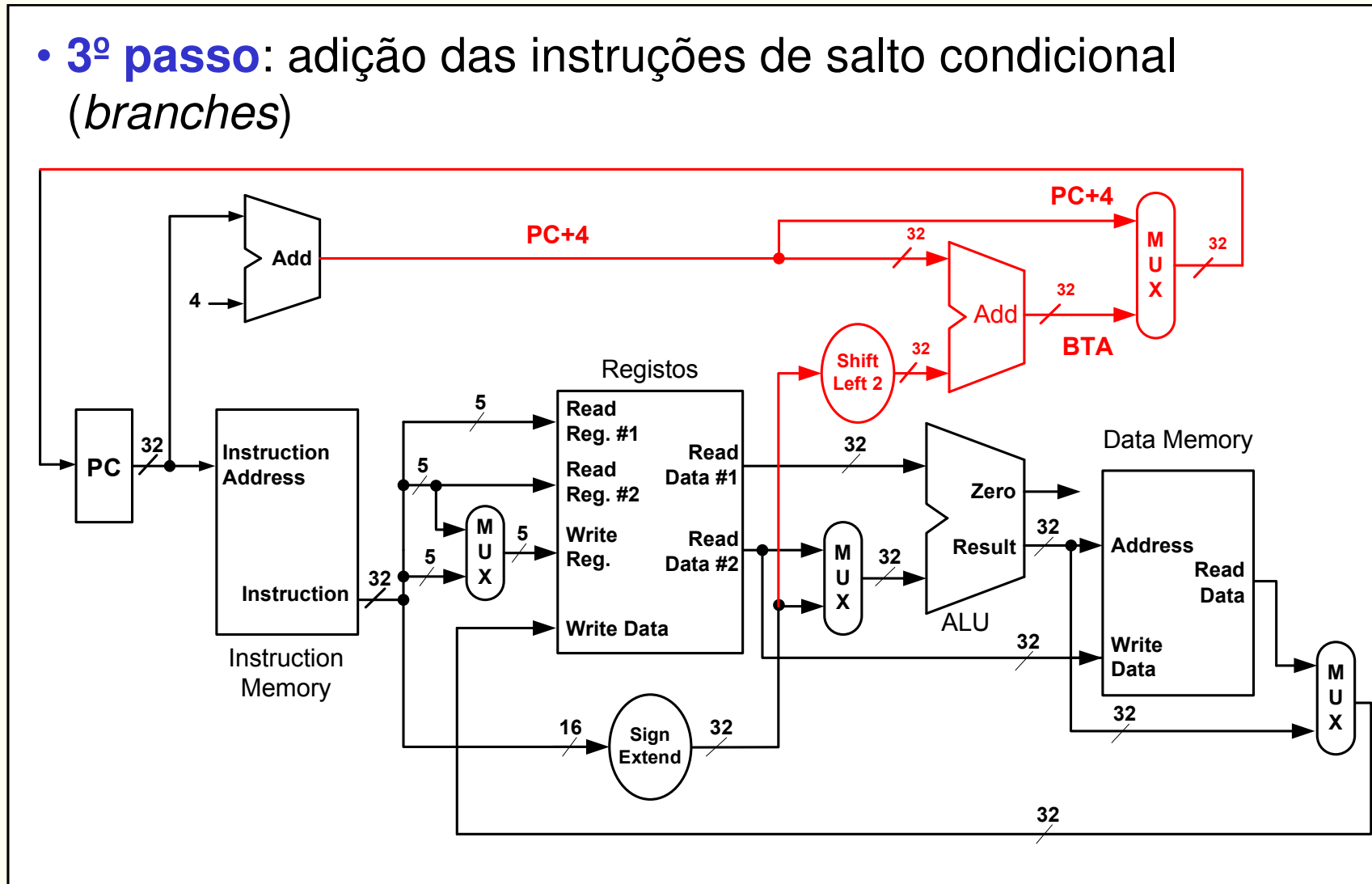
Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- **2º passo:** inclusão do bloco *Instruction Fetch*



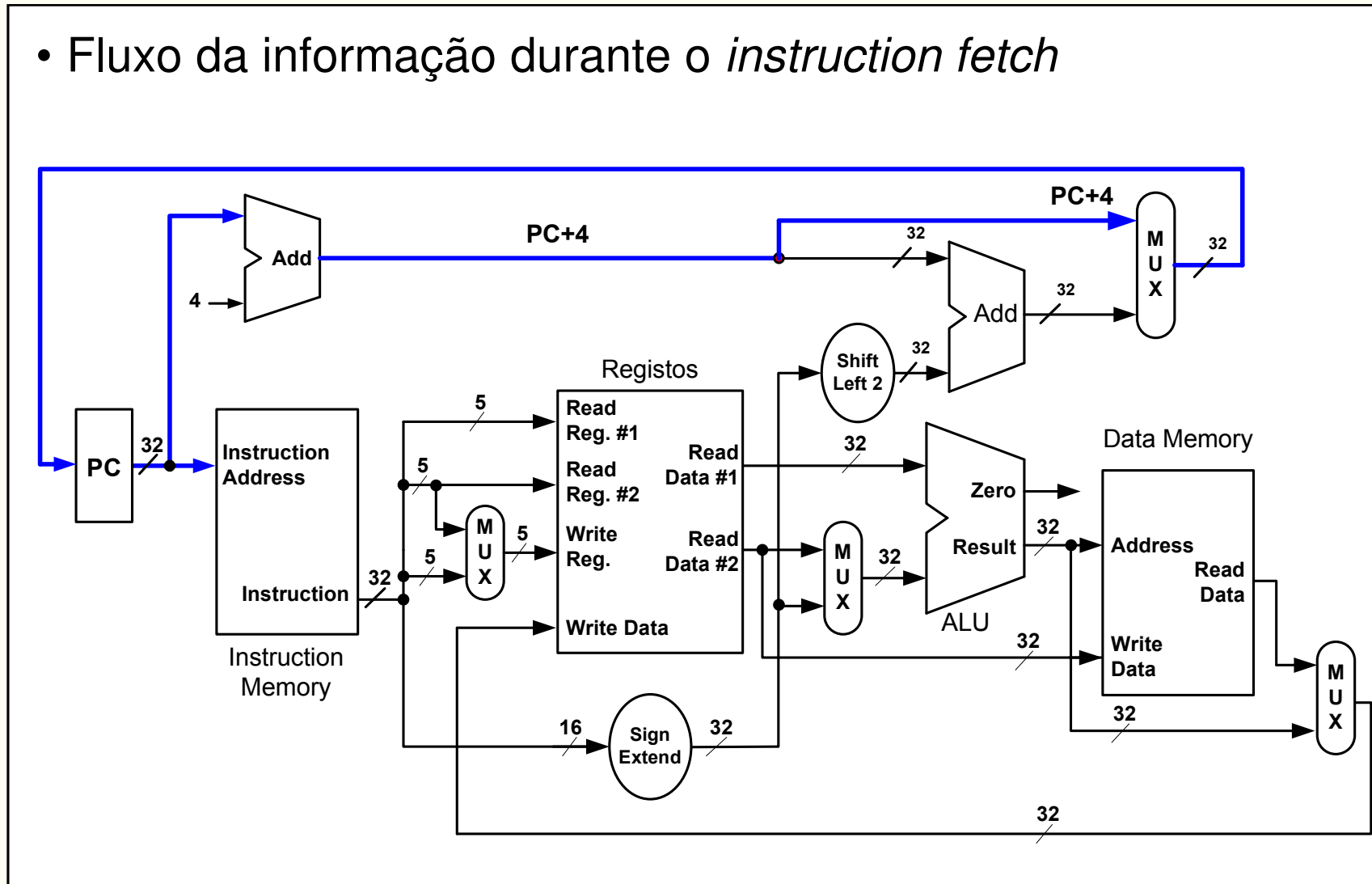
Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- **3º passo:** adição das instruções de salto condicional (*branches*)



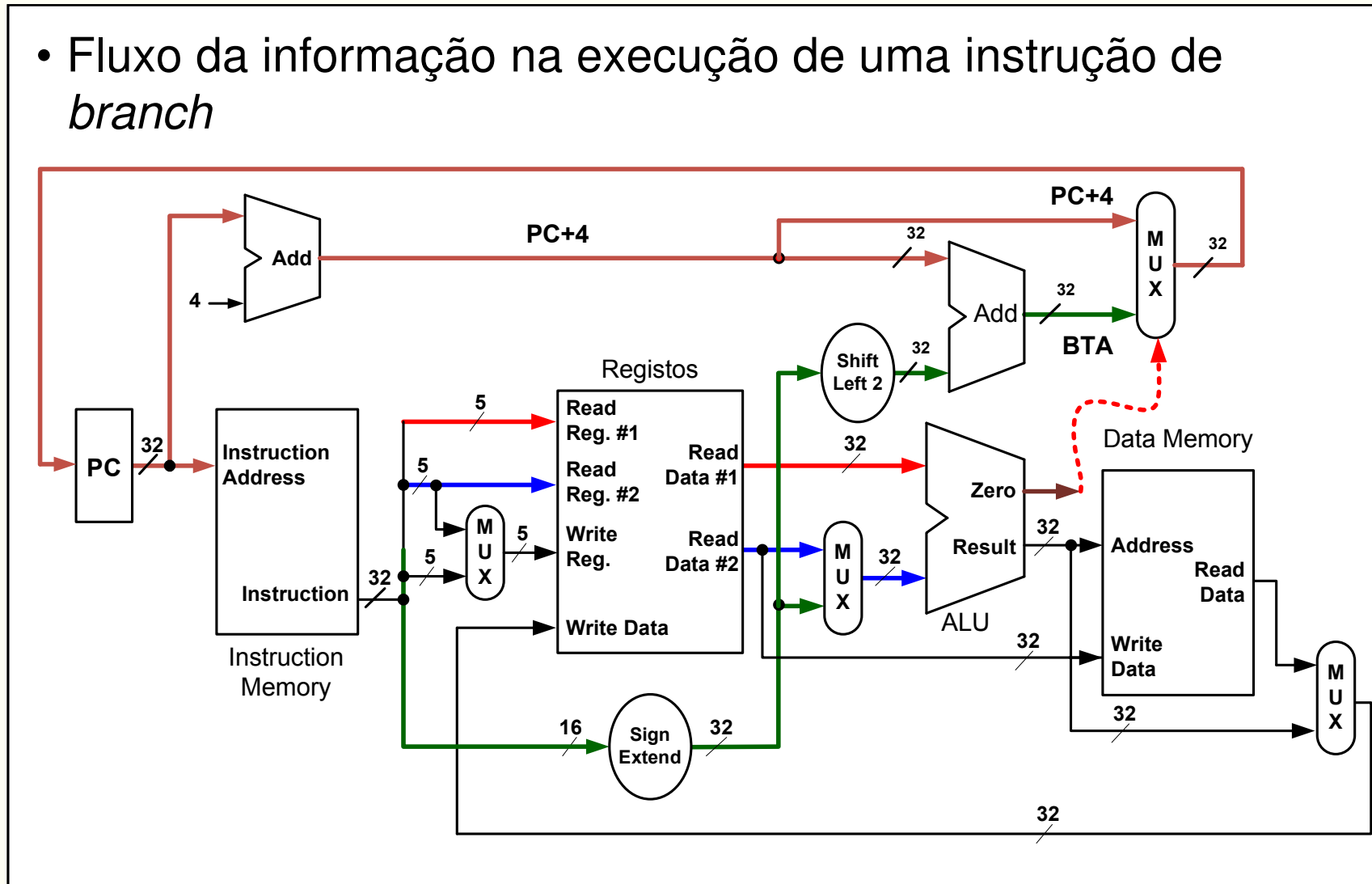
Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- Fluxo da informação durante o *instruction fetch*



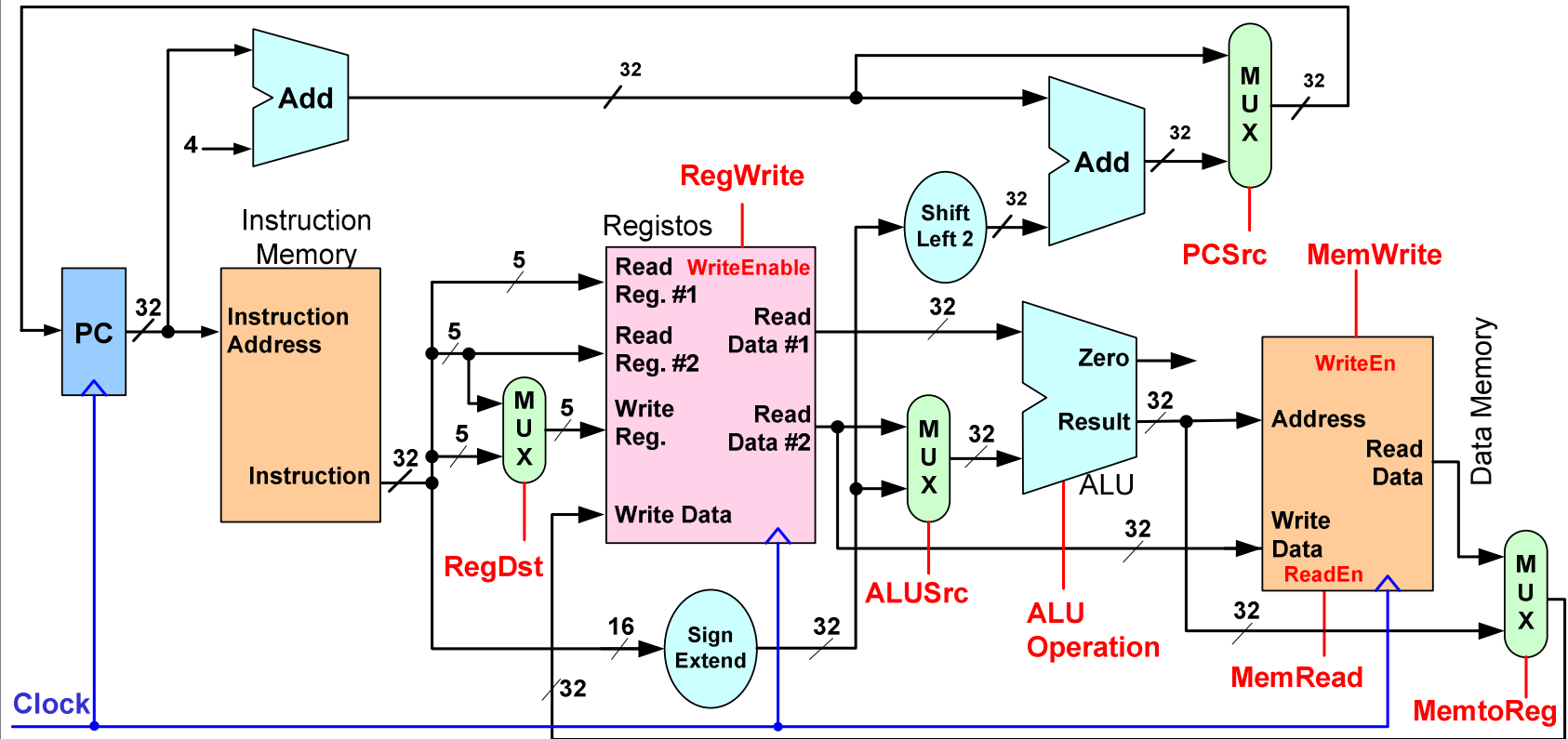
Implementação de um *Datapath* – juntando tudo

- Fluxo da informação na execução de uma instrução de *branch*



Datapath single-cycle completo

- Datapath completo com identificação dos sinais de controlo



A utilização de memórias distintas para dados e código, permite a execução de cada instrução num único ciclo de relógio

Que alterações é necessário fazer para incluir a execução do “bne” ?