

## Aula 2

- Princípios básicos de projeto de uma arquitetura
- Aspectos chave da arquitetura MIPS
- Instruções aritméticas
- Instruções lógicas e de deslocamento
- Codificação de instruções no MIPS: formato R

Bernardo Cunha, José Luís Azevedo, Arnaldo Oliveira

# Instruções e implementação hardware

- No projeto de um processador a definição do ***instruction set*** exige um delicado compromisso entre múltiplos aspetos, nomeadamente:
  - as facilidades oferecidas aos programadores (por ex. instruções de manipulação de *strings*)
  - a complexidade do hardware envolvido na sua implementação
- Quatro princípios básicos estão subjacentes a um bom design ao nível do hardware:
  - A regularidade favorece a simplicidade
  - Quanto mais pequeno mais rápido
  - O que é mais comum deve ser mais rápido
  - Um bom design implica compromissos adequados

# Instruções e implementação hardware

- **A regularidade favorece a simplicidade**
  - Ex1: todas as instruções do *instruction set* são codificadas com o mesmo número de bits
  - Ex2: instruções aritméticas operam sempre sobre registos internos e depositam o resultado também num registo interno
- **Quanto mais pequeno mais rápido**
- **O que é mais comum deve ser mais rápido**
  - Ex: quando o operando é uma constante esta deve fazer parte da instrução (é vulgar que mais de 50% das instruções que envolvem a ALU num programa utilizem constantes)
- **Um bom *design* implica compromissos adequados**
  - Ex: o compromisso que resulta entre a possibilidade de se poder codificar constantes de maior dimensão nas instruções e a manutenção da dimensão fixa nas instruções

# ISA – formato e codificação das instruções

- Codificação das instruções com um número de bits variável
  - Código mais pequeno
  - Maior flexibilidade
  - *Instruction fetch* em vários passos
- Codificação das instruções com um número de bits fixo
  - *Instruction fetch* e *decode* mais simples
  - Mais simples de implementar em *pipeline*

## ISA – número de registos internos do CPU

- Vantagens de um número pequeno de registos
  - Menos hardware
  - Acesso mais rápido
  - Menos bits para identificação do registo
  - Mudança de contexto mais rápida
- Vantagens de um número elevado de registos
  - Menos acessos à memória
  - Algumas variáveis dos programas podem residir em registos
  - Certos registos podem ter restrições de utilização

# ISA – localização dos operandos das instruções

- Arquiteturas baseadas em **acumulador**
  - Resultado das operações é armazenado num registo especial designado de acumulador
    - **add a**                      **# acc ← acc + a**
- Arquiteturas baseadas em **Stack**
  - Operandos e resultado armazenados numa *stack* (pilha) de registos
    - **add**                      **# tos ← tos + next**  
                                  **(tos = *top of stack*)**

# ISA – localização dos operandos das instruções

- Arquiteturas **Register-Memory**

- Operandos das instruções aritméticas e lógicas residem em registos internos do CPU ou em memória

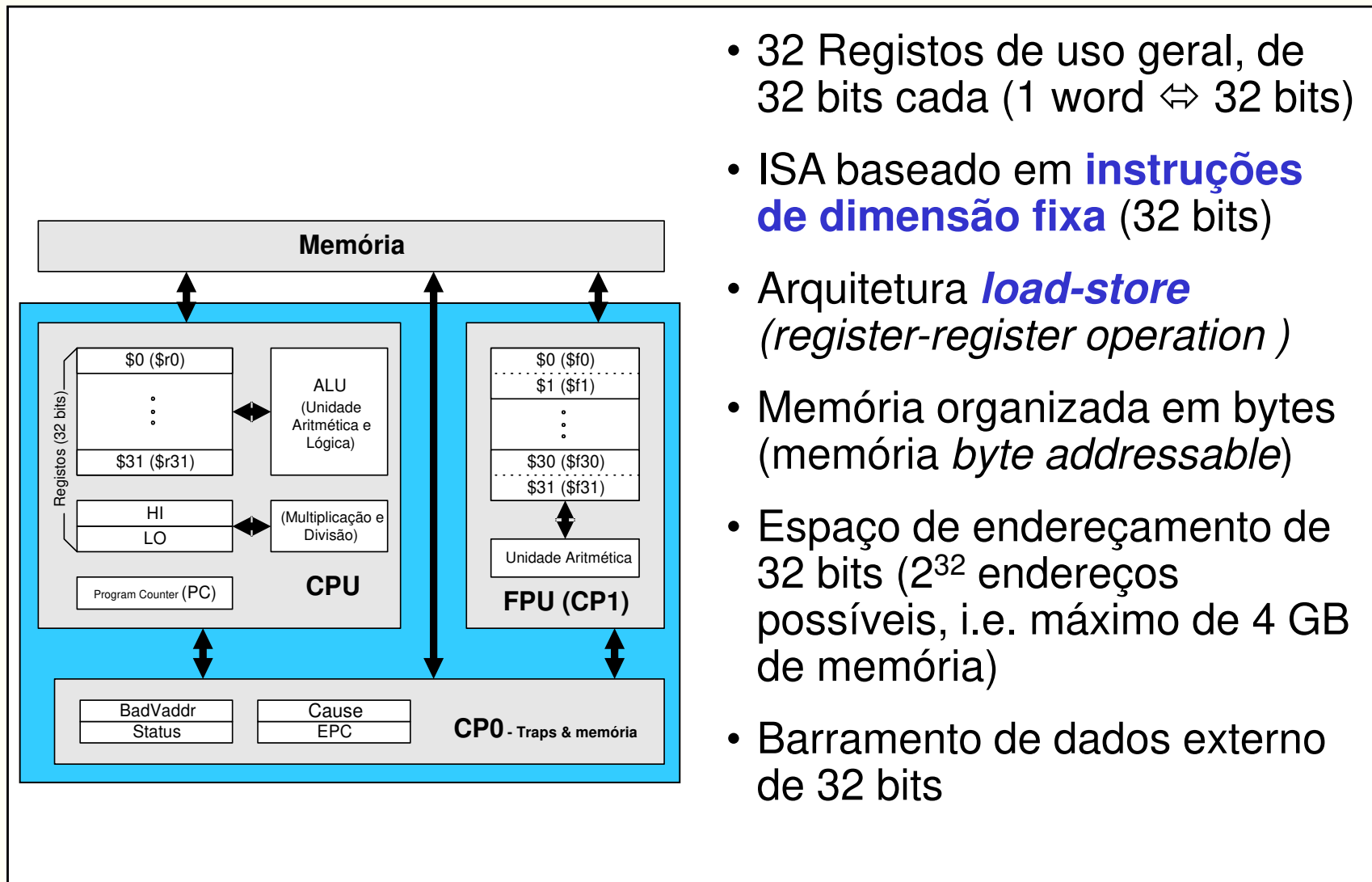
- **load**    **r1, [a]**                    **# r1 ← mem[a]**
- **add**     **r1, [b]**                    **# r1 ← r1 + mem[b]**
- **store**    **[c], r1**                    **# mem[c] ← r1**

- Arquiteturas **Load-store**

- Operandos das instruções aritméticas e lógicas residem em registos internos do CPU de uso geral (mas nunca na memória).

- **load**     **r1, [a]**                    **# r1 ← mem[a]**
- **load**     **r2, [b]**                    **# r2 ← mem[b]**
- **add**      **r3, r1, r2**                **# r3 ← r1 + r2**
- **store**    **[c], r3**                    **# mem[c] ← r3**

# Aspetos chave da arquitetura MIPS



- 32 Registos de uso geral, de 32 bits cada (1 word  $\Leftrightarrow$  32 bits)
- ISA baseado em **instruções de dimensão fixa** (32 bits)
- Arquitetura **load-store** (*register-register operation*)
- Memória organizada em bytes (*memória byte addressable*)
- Espaço de endereçamento de 32 bits ( $2^{32}$  endereços possíveis, i.e. máximo de 4 GB de memória)
- Barramento de dados externo de 32 bits



# Instruções aritméticas - SOMA

Formato da instrução *Assembly* do MIPS:



`add a, b, c` **#** *Soma **b** com **c** e armazena o resultado  
# em **a** ( $a = b + c$ )* comentário

# Instruções aritméticas - SOMA

Formato da instrução *Assembly* do MIPS:

**add** **a, b, c** # Soma **b** com **c** e armazena o resultado  
# em **a** ( $a = b + c$ )

Uma expressão do tipo

**z = a + b + c + d**

Tem de ser decomposta em:

**add**        **z, a, b**    # Soma **a** com **b**, resultado em **z**  
**add**        **z, z, c**    # Soma **z** com **c**, resultado em **z**  
**add**        **z, z, d**    # Soma **z** com **d**, resultado em **z**

# Instruções aritméticas - SUBTRAÇÃO

Formato da instrução Assembly do Mips:

**sub** **a, b, c** # Subtrai **c** a **b** e armazena o resultado  
# em **a** ( $a = b - c$ )

**Exemplo:** A expressão  $z = (a + b) - (c + d)$

tem de ser decomposta em:

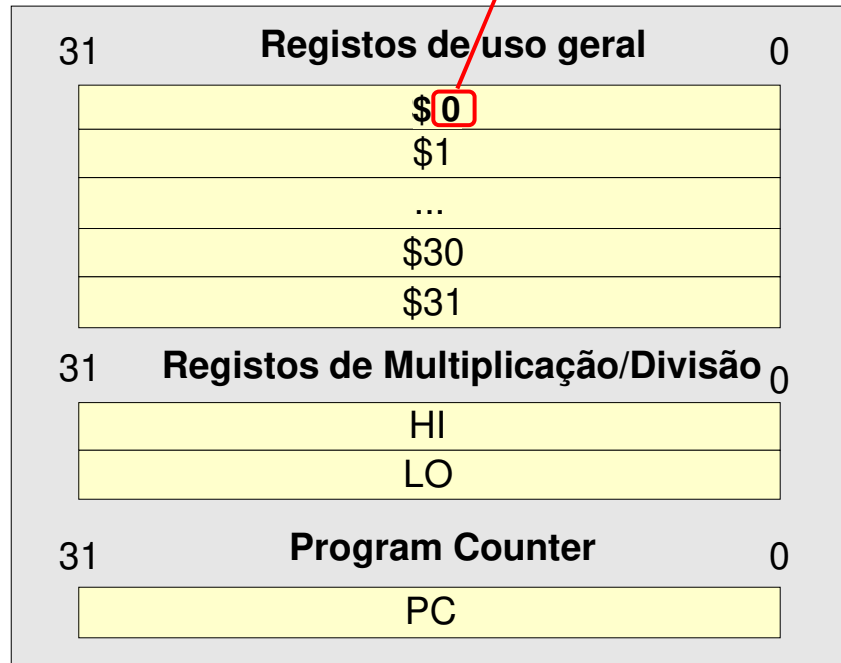
**add** **x, a, b** # Soma **a** com **b**, resultado em **x**

**add** **y, c, d** # Soma **c** com **d**, resultado em **y**

**sub** **z, x, y** # Subtrai **y** a **x**, e coloca o resultado em **z**

# Os registos internos do MIPS

Endereço do registo (0 a 31)



**Program Counter:** registo que contém o endereço de memória onde está armazenado o código da próxima instrução a executar

- Em *assembly* são, normalmente, usados nomes alternativos para os registos (nomes virtuais):

- **\$zero (\$0)**
- **\$at (\$1)**
- **\$v0 e \$v1 (\$2 e \$3)**
- **\$a0 a \$a3**
- **\$t0 a \$t9**
- **\$s0 a \$s7**
- **\$sp (\$29)**
- **\$ra (\$31)**

- Registo **\$0** tem sempre o valor **0x00000000** (apenas pode ser lido)

## Exemplo de tradução de C para *Assembly* MIPS

- Programa em C:

```
int a, b, c, d, z;  
z = (a + b) - (c + d);
```

- Em *assembly* (supondo que a, b, c, d, z residem em a: \$17, b: \$18, c: \$19, d: \$20 e z: \$16):

```
add  $8, $17, $18 # Soma $17 com $18 e armazena o  
                    # resultado em $8  
add  $9, $19, $20 # Soma $19 com $20 e armazena o  
                    # resultado em $9  
sub   $16, $8, $9  # Subtrai $9 a $8 e armazena o  
                    # resultado em $16
```

# Exemplo de tradução de C para *Assembly* MIPS

- Programa em C:

```
int  a, b, c, d, z;  
z = (a + b) - (c + d);
```

---

```
# a: $17, b: $18, c: $19, d: $20, z: $16
```

```
...
```

```
add  $8, $17, $18  # r1 = a + b;
```

```
add  $9, $19, $20  # r2 = c + d;
```

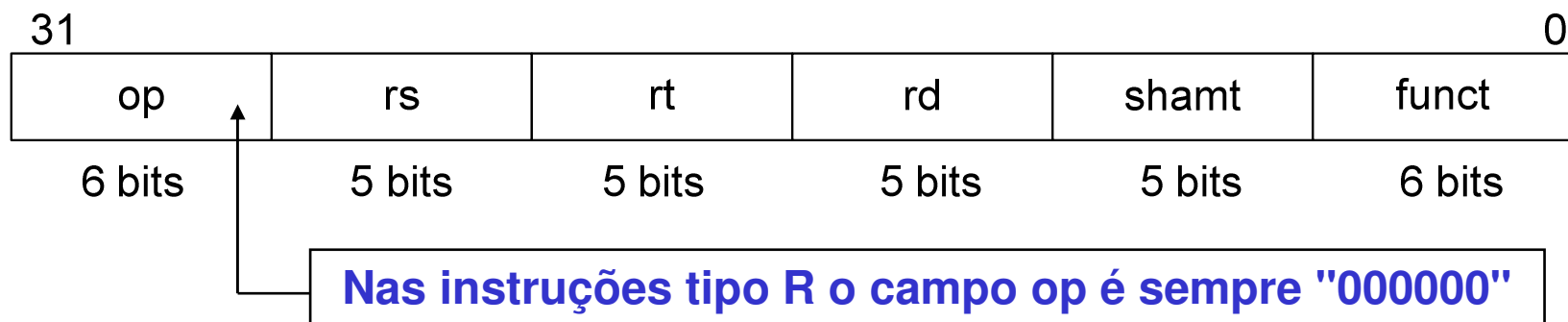
```
sub  $16, $8, $9   # z = (a + b) - (c + d);
```

```
...
```

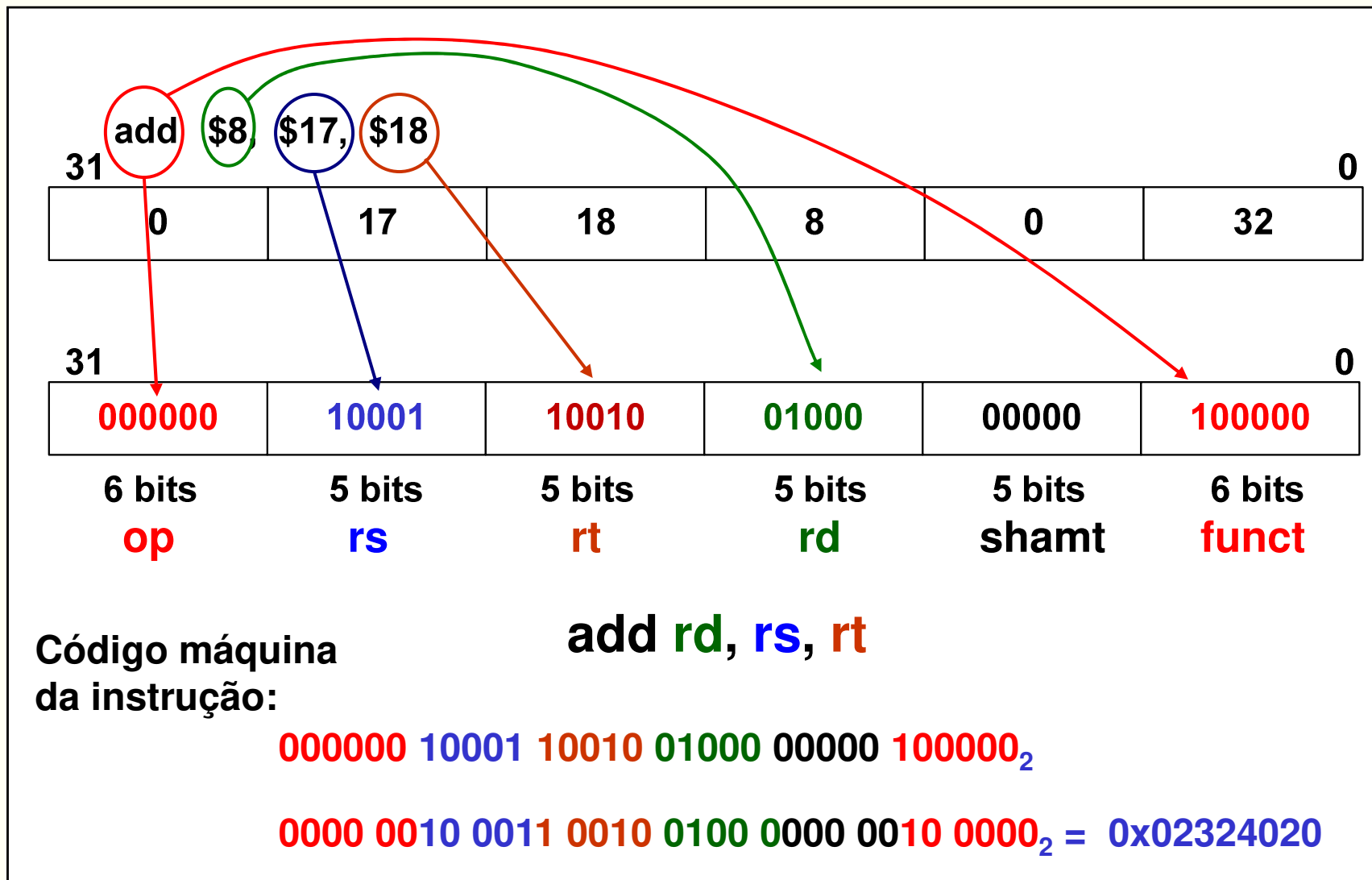
- A linguagem C é uma excelente forma de comentar programas em *Assembly* uma vez que permite uma interpretação direta e mais simples do(s) algoritmo(s) implementado(s).

# Codificação de instruções no MIPS – formato R

- O formato R é um dos três formatos de codificação de instruções no MIPS
- Campos da instrução:
  - op:** *opcode* (é sempre zero nas instruções tipo R)
  - rs:** Endereço do registo que contém o 1º operando fonte
  - rt:** Endereço do registo que contém o 2º operando fonte
  - rd:** Endereço do registo onde o resultado vai ser armazenado
  - shamt:** *shift amount* (útil apenas em instruções de deslocamento)
  - funct:** código da operação a realizar



# Codificação de instruções no MIPS – formato R





# Instruções lógicas e de deslocamento

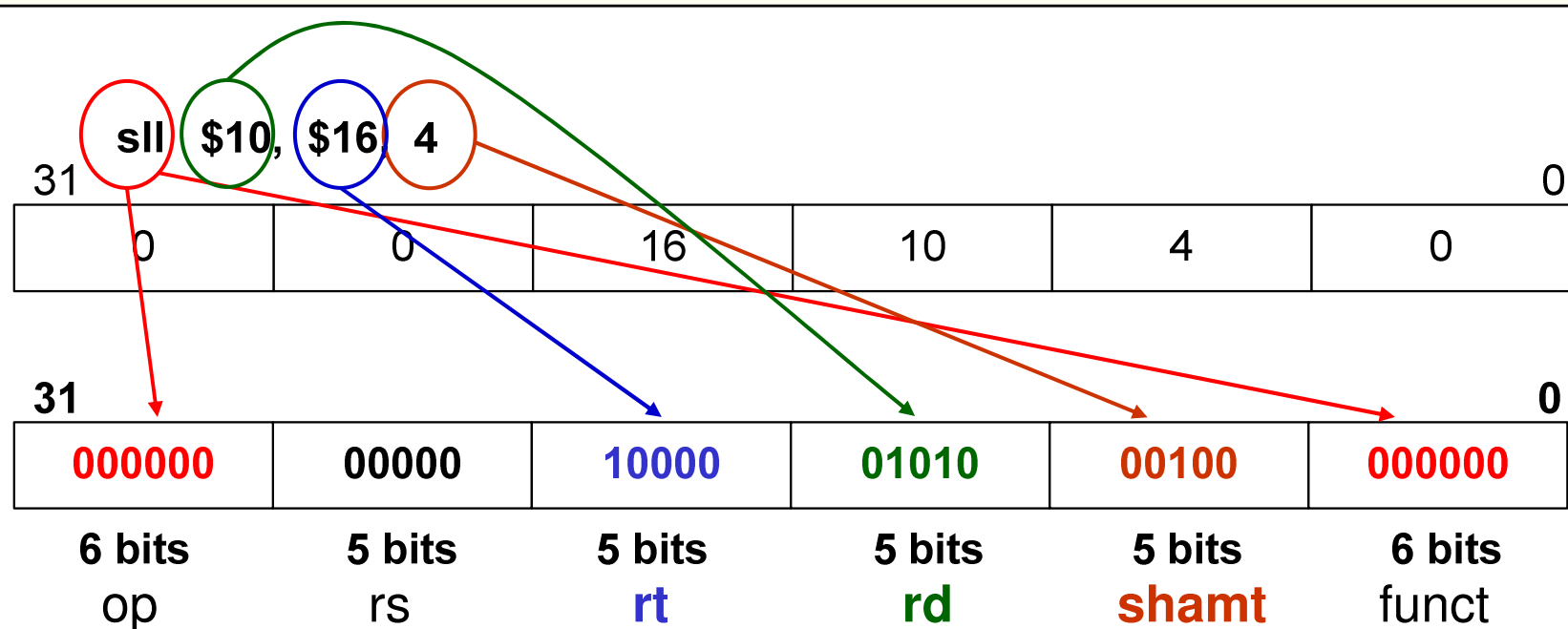
- Operadores lógicos bit a bit (*bitwise operators*) em C:
  - **&** (AND), **|** (OR), **^** (XOR), **~** (NOT)
- A operação indicada é realizada bit a bit nos dois operandos, no caso do AND, do OR e do XOR e é feita a negação de todos os bits do operando no caso do NOT.
- Os operadores bit a bit "**&**" e "**|**" não devem ser confundidos com os operadores lógicos "**&&**" e "**||**".
- **Exercício**: determine os resultados deste programa:

```
void main(void)
{
    int a = 10;
    int b = 9;
    printf("a & b = %d\n", a & b);    // ?
    printf("a && b = %d\n", a && b);  // ?
    printf("a | b = %d\n", a | b);    // ?
    printf("a || b = %d\n", a || b);  // ?
}
```

# Instruções lógicas e de deslocamento

- Operadores lógicos bitwise em C:
  - **&** (AND), **|** (OR), **^** (XOR), **~** (NOT)
- Instruções lógicas do MIPS
  - **and Rdst, Rsrc1, Rsrc2** # Rdst = Rsrc1 & Rsrc2
  - **or Rdst, Rsrc1, Rsrc2** # Rdst = Rsrc1 | Rsrc2
  - **nor Rdst, Rsrc1, Rsrc2** # Rdst = ~(Rsrc1 | Rsrc2)
  - **xor Rdst, Rsrc1, Rsrc2** # Rdst = (Rsrc1 ^ Rsrc2)
- Operadores de deslocamento em C:
  - **<<** shift left
  - **>>** shift right, **lógico** ou **aritmético**, dependendo da variável ser do tipo **unsigned** ou **signed**, respetivamente
- Instruções de deslocamento do MIPS
  - **sll Rdst, Rsrc, k** # Rdst = Rsrc << k; (shift left logical)
  - **srl Rdst, Rsrc, k** # Rdst = Rsrc >> k; (shift right logical)
  - **sra Rdst, Rsrc, k** # Rdst = Rsrc >> k; (shift right arithmetic)

# Codificação de instruções no MIPS – formato R



**sll** **rd**, **rt**, **shamt**

Código máquina  
da instrução:

**00000000000100000101000100000000<sub>2</sub> = 0x00105100**

O que faz a instrução cujo código máquina é: 0x00000000 ?

## Instruções de transferência entre registros internos

- Transferência entre registros internos:  $R_{dst} = R_{src}$
- Registro **\$0** do MIPS tem sempre o valor **0x00000000** (apenas pode ser lido)
- Utilizando o registro **\$0** e a instrução lógica OR é possível realizar uma operação de transferência entre registros internos:
  - **or Rdst, Rsrc, \$0**      #  $R_{dst} = (R_{src} | 0) = R_{src}$
  - Exemplo: **or \$t1, \$t2, \$0**    #  $\$t1 = \$t2$
- Para esta operação é habitualmente usada uma **instrução virtual** que melhora a legibilidade dos programas - **"move"**.
- No processo de geração do código máquina, o *assembler* substitui essa instrução pela instrução nativa anterior:
  - **move Rdst, Rsrc**      #  $R_{dst} = R_{src}$
  - Exemplo: **move \$t1, \$t2**    #  $\$t1 = \$t2$  (or  $\$t1, \$t2, \$0$ )

## Questões

- O que caracteriza as arquiteturas "register-memory" e "load-store"? De que tipo é a arquitetura MIPS?
- Com quantos bits são codificadas as instruções no MIPS? Quantos registos internos tem o MIPS? O que diferencia o registo `$0` dos restantes? Qual o número do registo interno do MIPS a que corresponde o registo `$ra`?
- Quais os campos em que se divide o formato de codificação **R**? Qual o significado de cada um desses campos? Qual o valor do campo **opCode** nesse formato?
- O que faz a instrução cujo código máquina é: `0x00000000`?
- O símbolo `>>` da linguagem C significa deslocamento à direita e é traduzido por **SRL** ou **SRA** (no caso do MIPS). Quando é que usado **SRL** e quando é que é usado **SRA**?
- Qual a instrução nativa do MIPS em que é traduzida a instrução virtual `"move $4, $15"`?

## Exercícios

- Determine o código máquina das seguintes instruções:  
**xor \$5, \$13, \$24 - sub \$30, \$14, 8 - sll \$3, \$9, 7**  
**sra \$18, \$9, 8**
- Traduza para instruções *assembly* do MIPS a seguinte expressão aritmética, supondo **x** e **y** inteiros e residentes em **\$t2** e **\$t5**, respetivamente (apenas pode usar instruções nativas e não deverá usar a instrução de multiplicação):  
**y = -3 \* x + 5;**
- Traduza para instruções *assembly* do MIPS o seguinte trecho de código:  
**int a, b, c; //a:\$t0, b:\$t1, c:\$t2**  
**unsigned int x, y, z; //x:\$a0, y:\$a1, z:\$a2**  
**z = x >> 2 + y;**  
**c = a >> 5 - 2 \* b;**