

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 *sendo regular, as operações de R/W não são mais rápidas*
- 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

As constantes têm um tamanho máximo de 16 bits

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

Registros
MIPS: 32
Intel: 16?

- Arquiteturas **Register-Memory**

- Operandos das instruções aritméticas e lógicas residem em registros 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**

Um dos operandos é um registro ou uma memória

- Arquiteturas **Load-store**

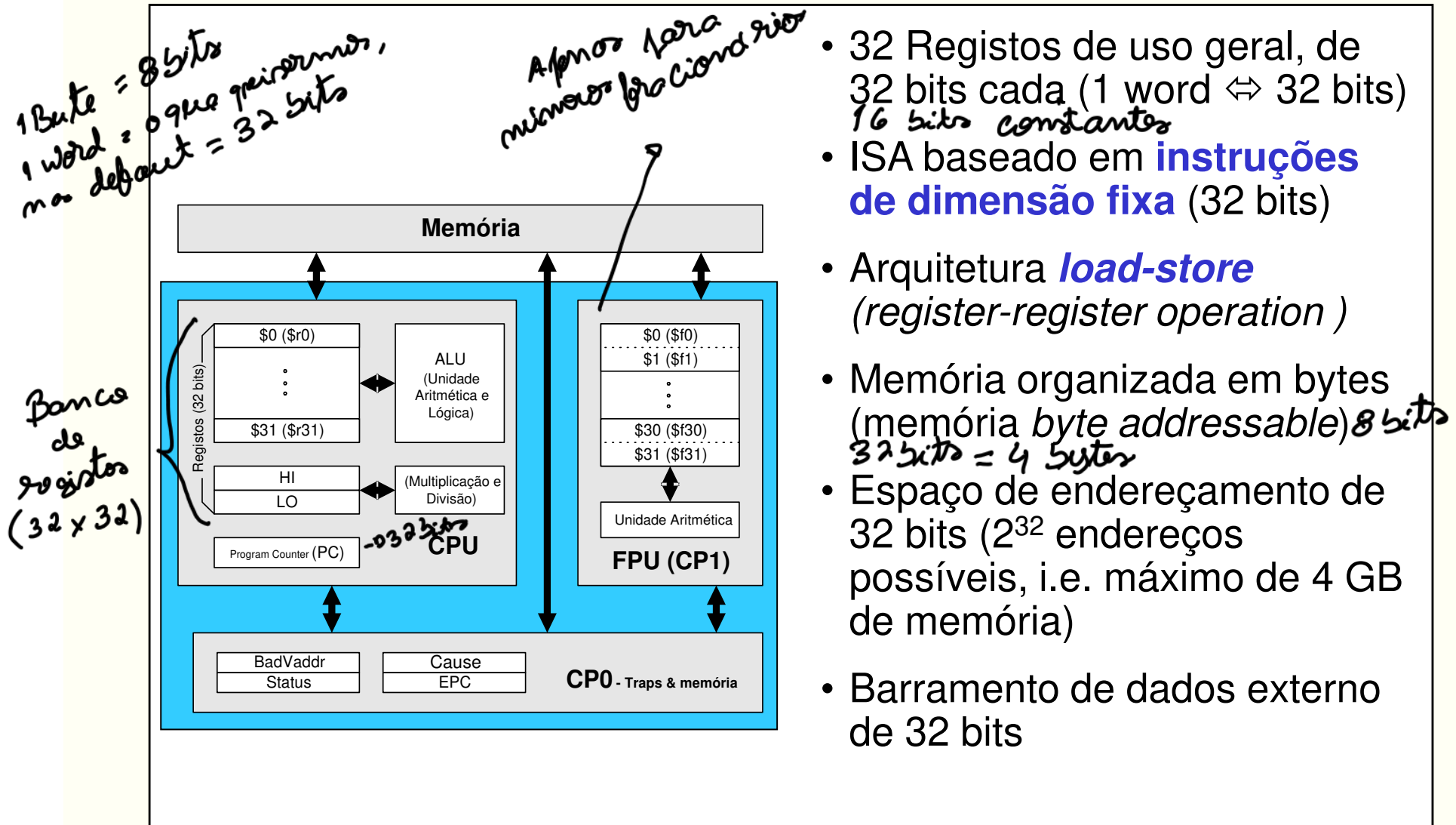
- Operandos das instruções aritméticas e lógicas residem em registros internos do CPU de uso geral (mas nunca na memória).

- **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**

O operando é um registro obrigatoriamente!

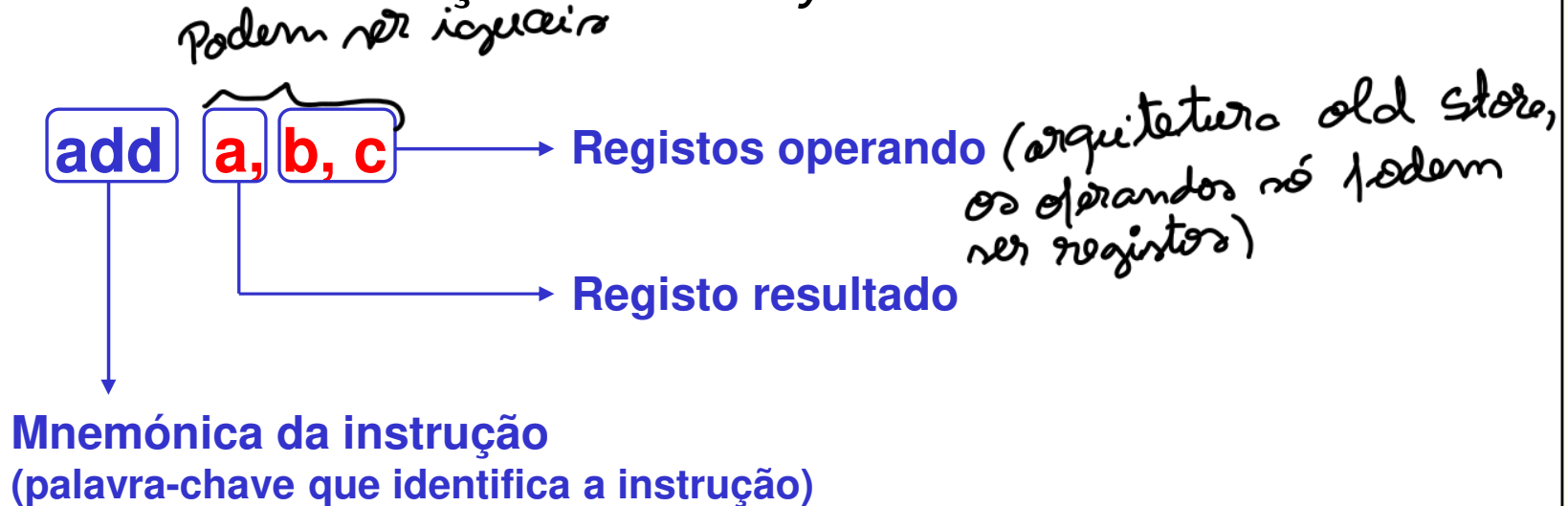
Nota: Quanto maior o número de registros, maior será o tempo de execução

Aspetos chave da arquitetura MIPS



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 ^R**a**, ^{importa a ordem}**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:

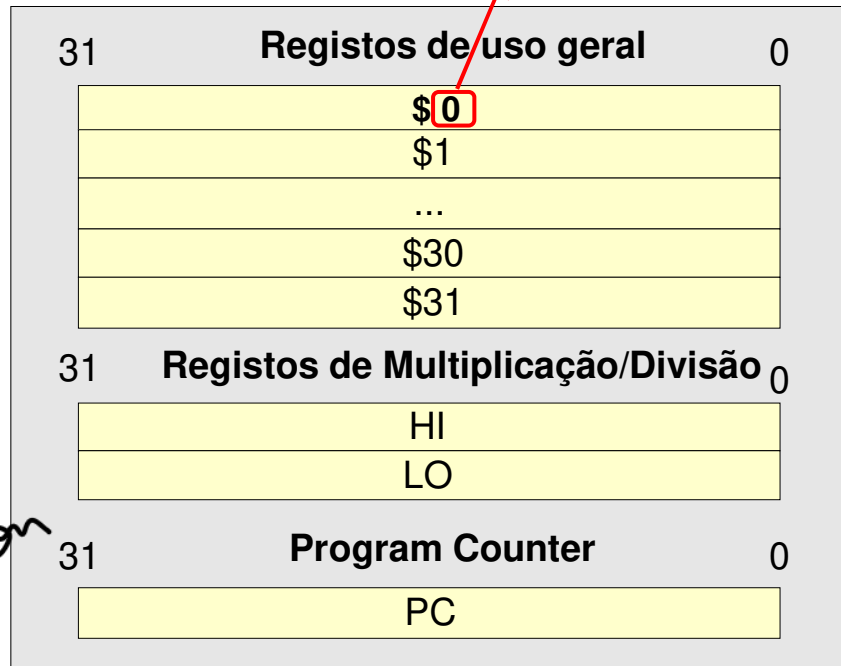
add **x**, **a**, **b** # Soma **a** com **b**, resultado em **x**

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)

Handwritten notes:
 - "instrução" (instruction) written vertically next to the PC register.
 - "32 bits" written next to the PC register.
 - "o endereço de memória da instrução a seguir" (the memory address of the instruction to follow) written below the PC register.
 - "1 inst = 0, 2 inst = 4, 9, ..." (1 instruction = 0, 2 instructions = 4, 9, ...) written at the bottom, with a note "(para avançar instruções, somar 32 bits, ou 4 bytes)".

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)

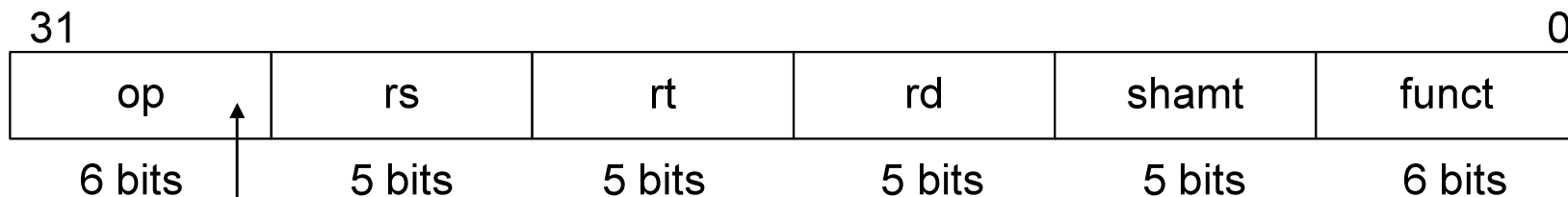
rs: Endereço do registo que contém o 1º operando fonte

rt: Endereço do registo que contém o 2º operando fonte

rd: Endereço do registo onde o resultado vai ser armazenado

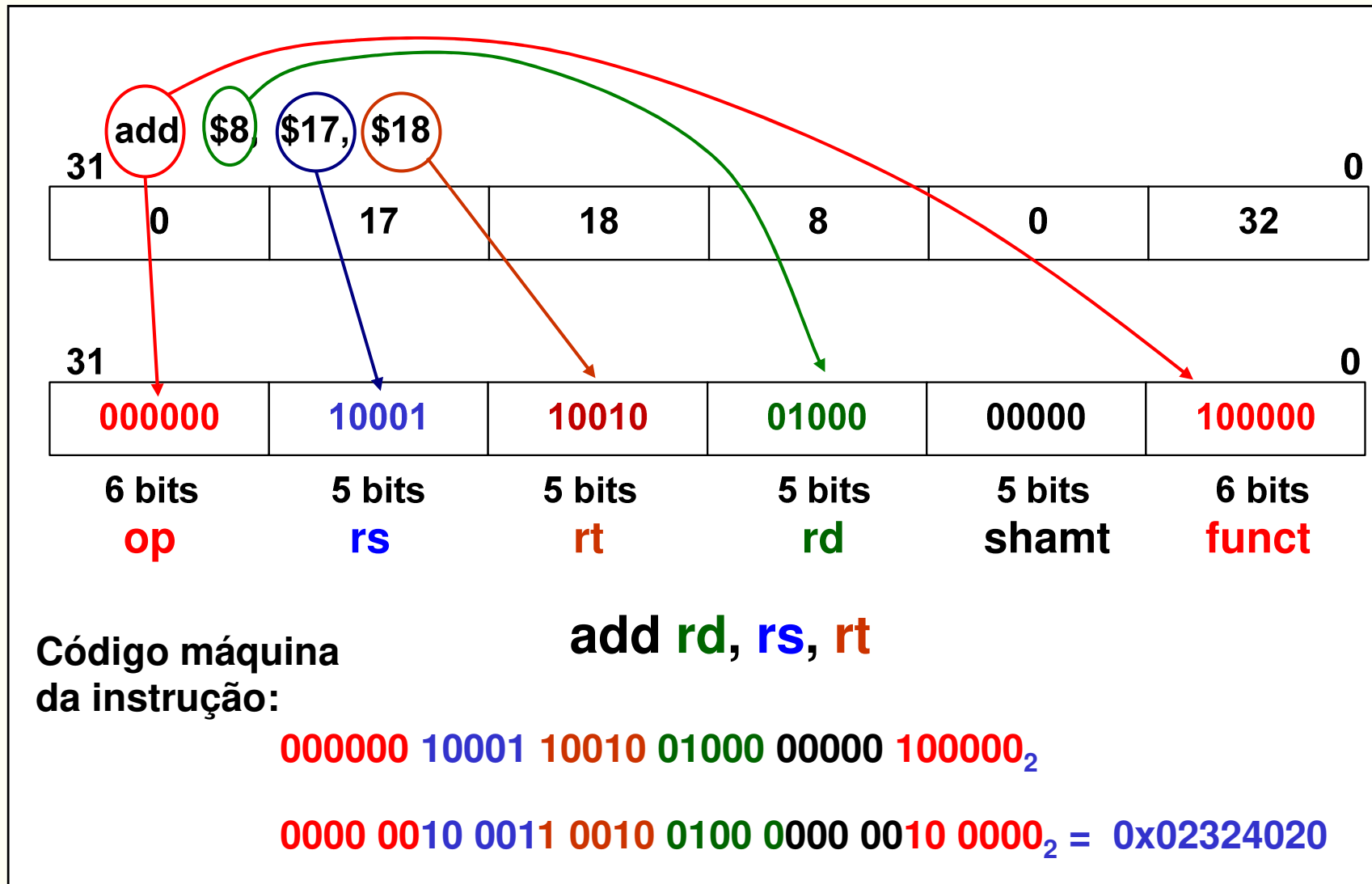
shamt: *shift amount* (útil apenas em instruções de deslocamento)

funct: código da operação a realizar



Nas instruções tipo R o campo op é sempre "000000"

Codificação de instruções no MIPS – formato R



Instruções lógicas e de deslocamento

- Operadores lógicos bit a bit (*bitwise operators*) em C: *Só interessam os bits nos primeiros posições. Não existe overflow. (dimensão igual aos operandos)*
 - **&** (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:

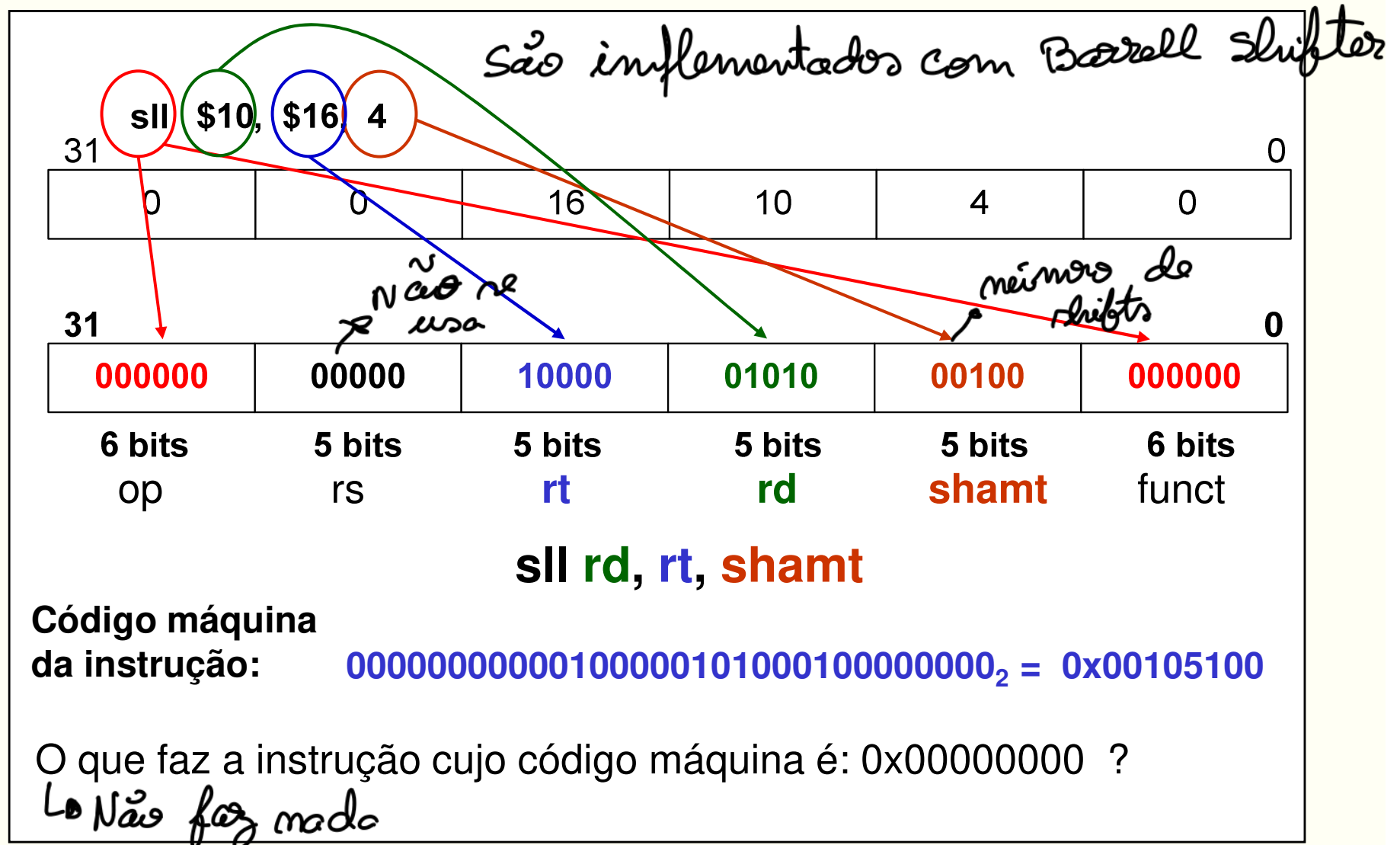
```
void main(void)
{
    int a = 10;
    int b = 9;
    printf("a & b = %d\n", a & b);    // ?
    printf("a && b = %d\n", a && b);  // ?
    printf("a | b = %d\n", a | b);    // ?
    printf("a || b = %d\n", a || b);  // ?
}
```

Instruções lógicas e de deslocamento

- Operadores lógicos bitwise em C:
 - **&** (AND), **|** (OR), **^** (XOR), **~** (NOT), **~ |** (NOR)
- 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)

Resultado original número de shifts

Codificação de instruções no MIPS – formato R



Instruções de transferência entre registros internos

- Transferência entre registros internos: $Rdst = Rsrc$
- 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** # $Rdst = (Rsrc | 0) = Rsrc$
 - 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** # $Rdst = Rsrc$
 - 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;