

Aulas 9 e 10

- Sub-rotinas: chamada e retorno
- Caracterização das sub-rotinas na perspectiva do "chamador" e do "chamado"
- Convenções adotadas na arquitetura MIPS quanto à:
 - passagem de parâmetros para sub-rotinas
 - devolução de valores de sub-rotinas
 - utilização e salvaguarda de registos
- A *stack* - conceito e operações básicas
- Utilização da *stack* na arquitetura MIPS
- Análise de um exemplo.

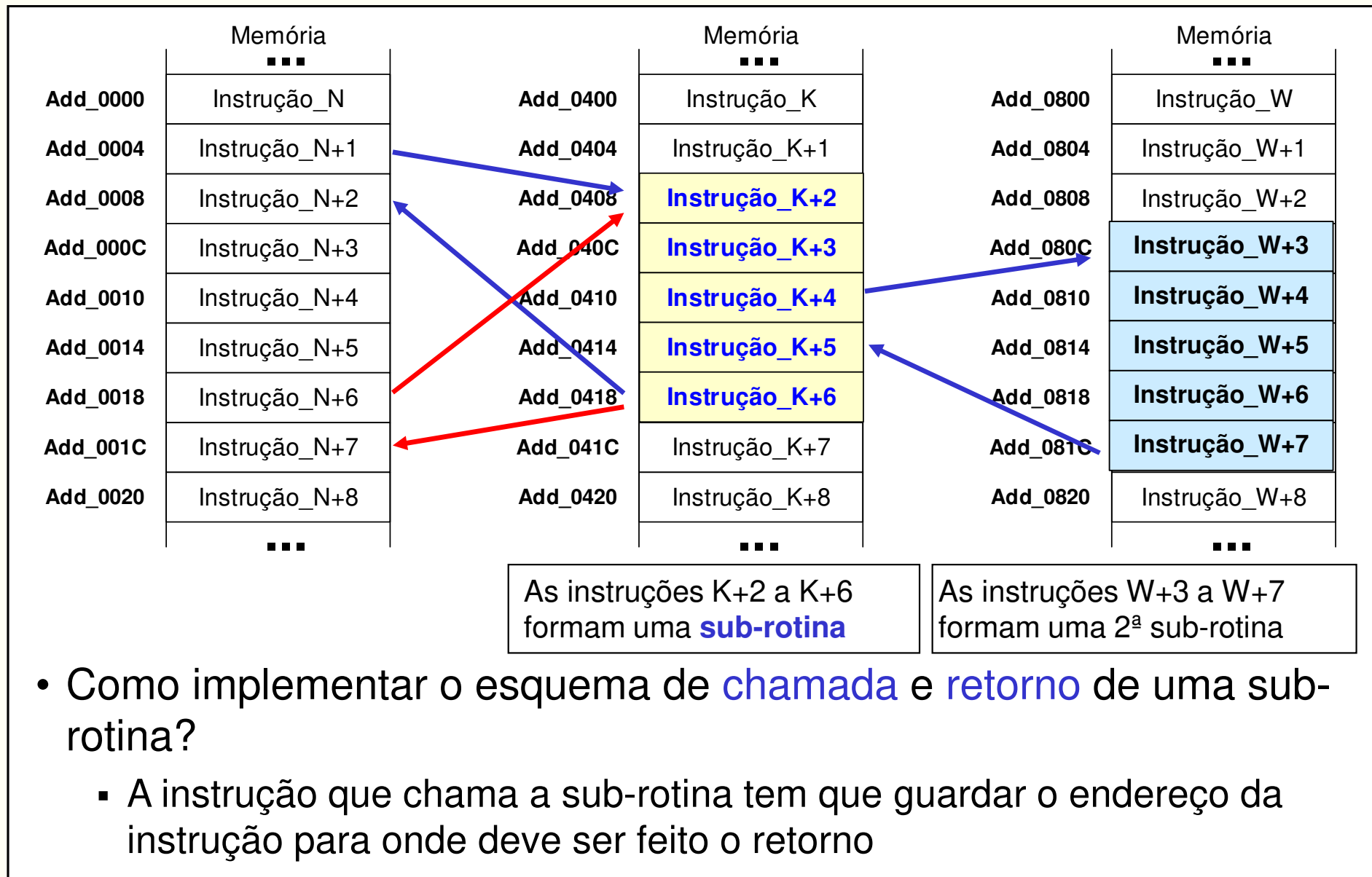
Bernardo Cunha, José Luís Azevedo, Arnaldo Oliveira

Porque se usam funções (sub-rotinas)?

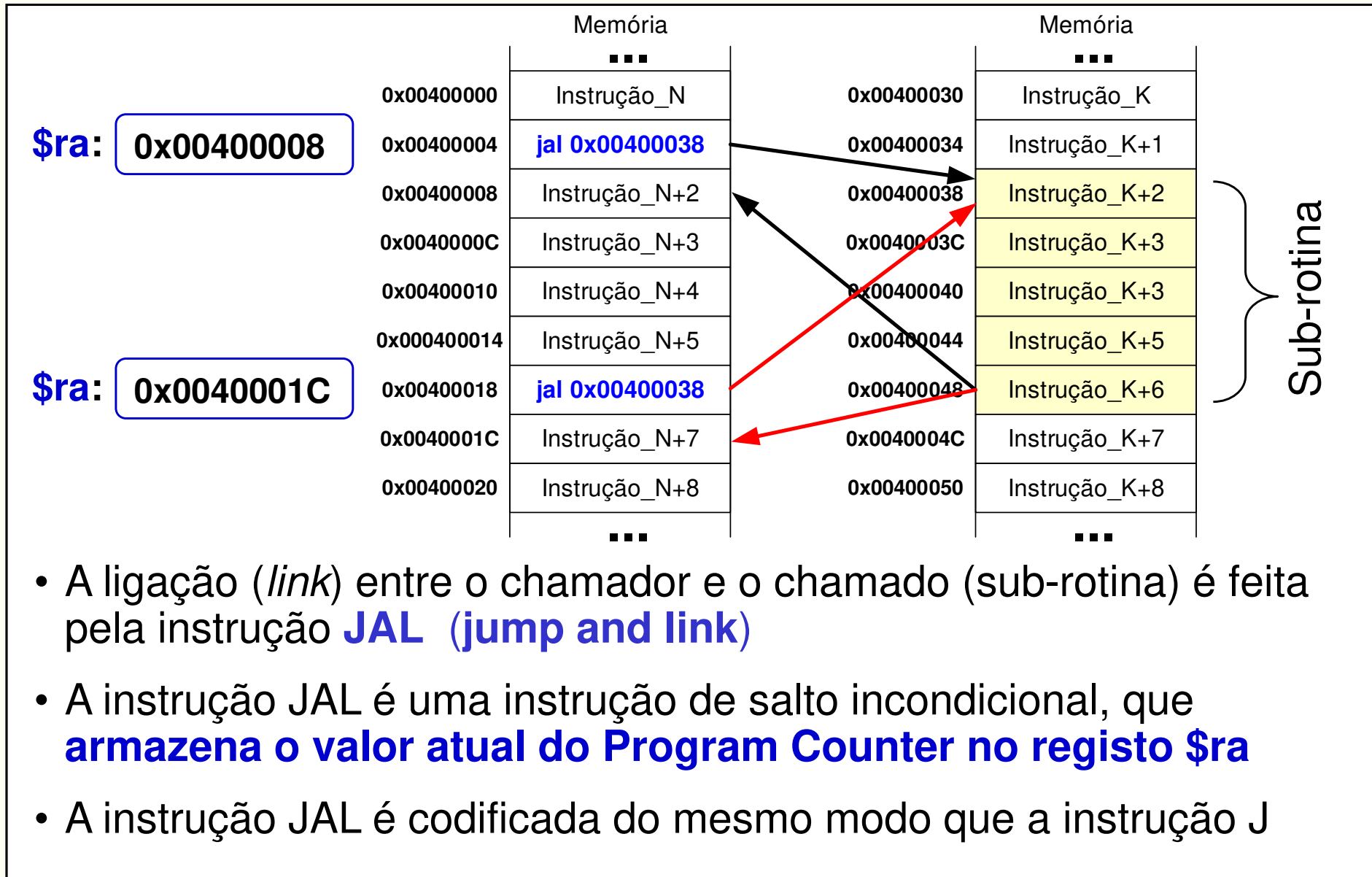
- Há três razões principais que justificam a existência de funções*:
 - A **reutilização no contexto de um determinado programa** - aumento da eficiência na dimensão do código, substituindo a repetição de um mesmo trecho de código por um único trecho evocável de múltiplos pontos do programa
 - A **reutilização no contexto de um conjunto de programas**, permitindo que o mesmo código possa ser reaproveitado (bibliotecas de funções)
 - A **organização e estruturação do código**

(*) No contexto da linguagem *Assembly*, as funções e os procedimentos são genericamente conhecidas por **sub-rotinas**!

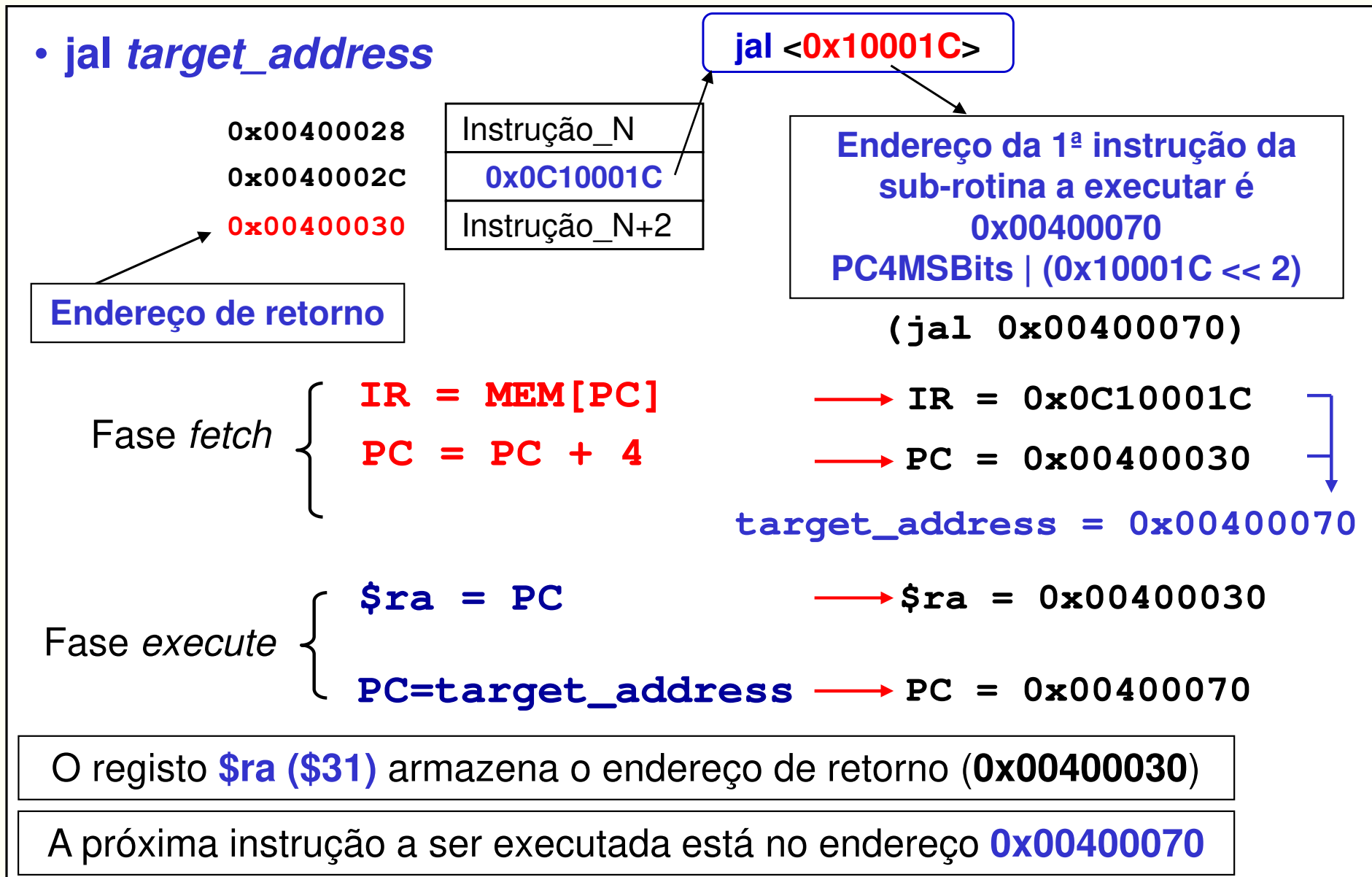
Sub-rotinas: exemplo



Sub-rotinas no MIPS: a instrução JAL

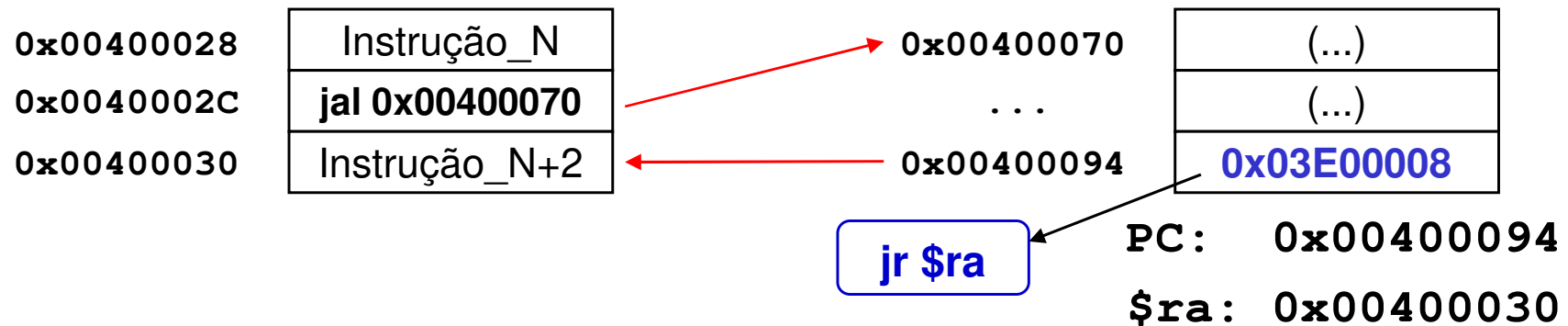


Ciclo de execução da instrução JAL



Ciclo de execução da instrução JR

- Como **regressar** à instrução que sucede à instrução "**jal**" ?
- Aproveita-se o endereço de retorno armazenado em **\$ra** durante a execução da instrução "**jal**" (instrução "**jr register**")

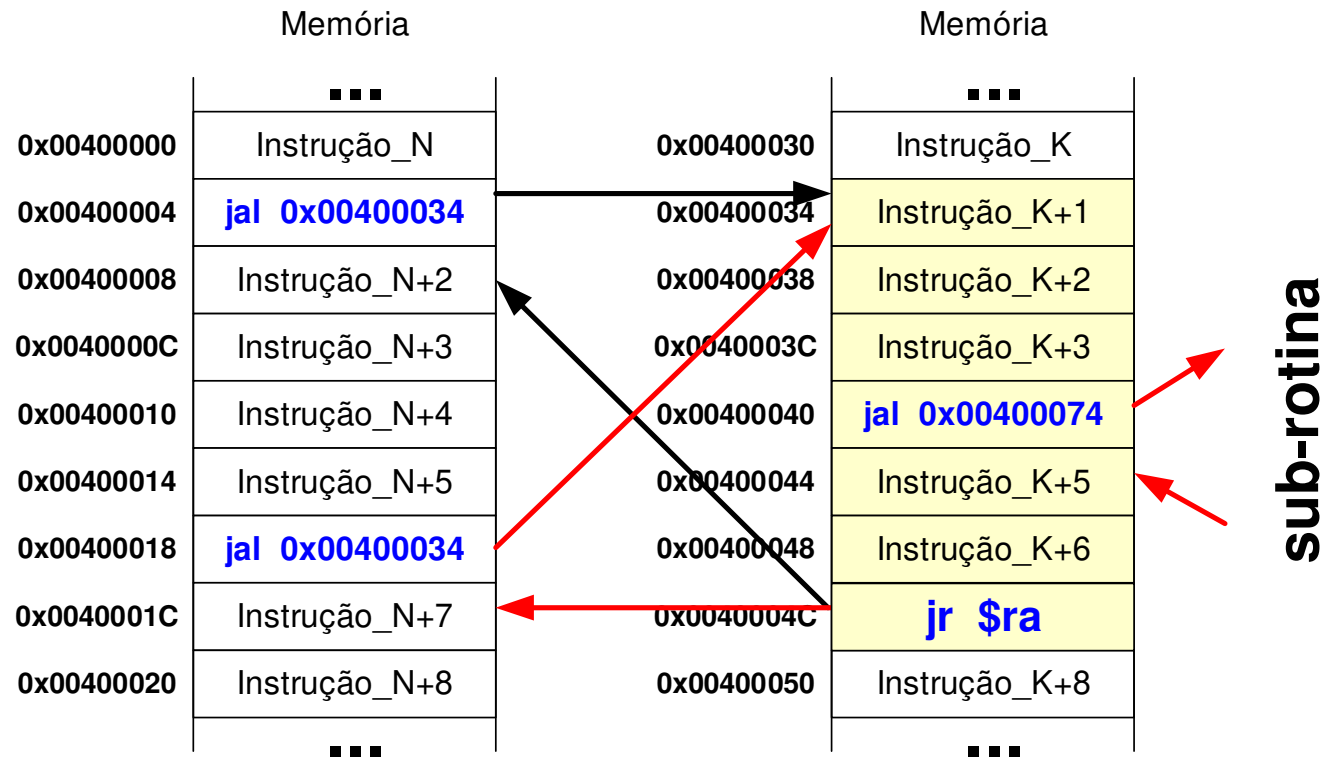


Fase *fetch* { $IR = MEM[PC] \longrightarrow IR = 0x03E00008$
 $PC = PC + 4 \longrightarrow PC = 0x00400098$

Fase *execute* { $PC = \$ra \longrightarrow PC = 0x00400030$

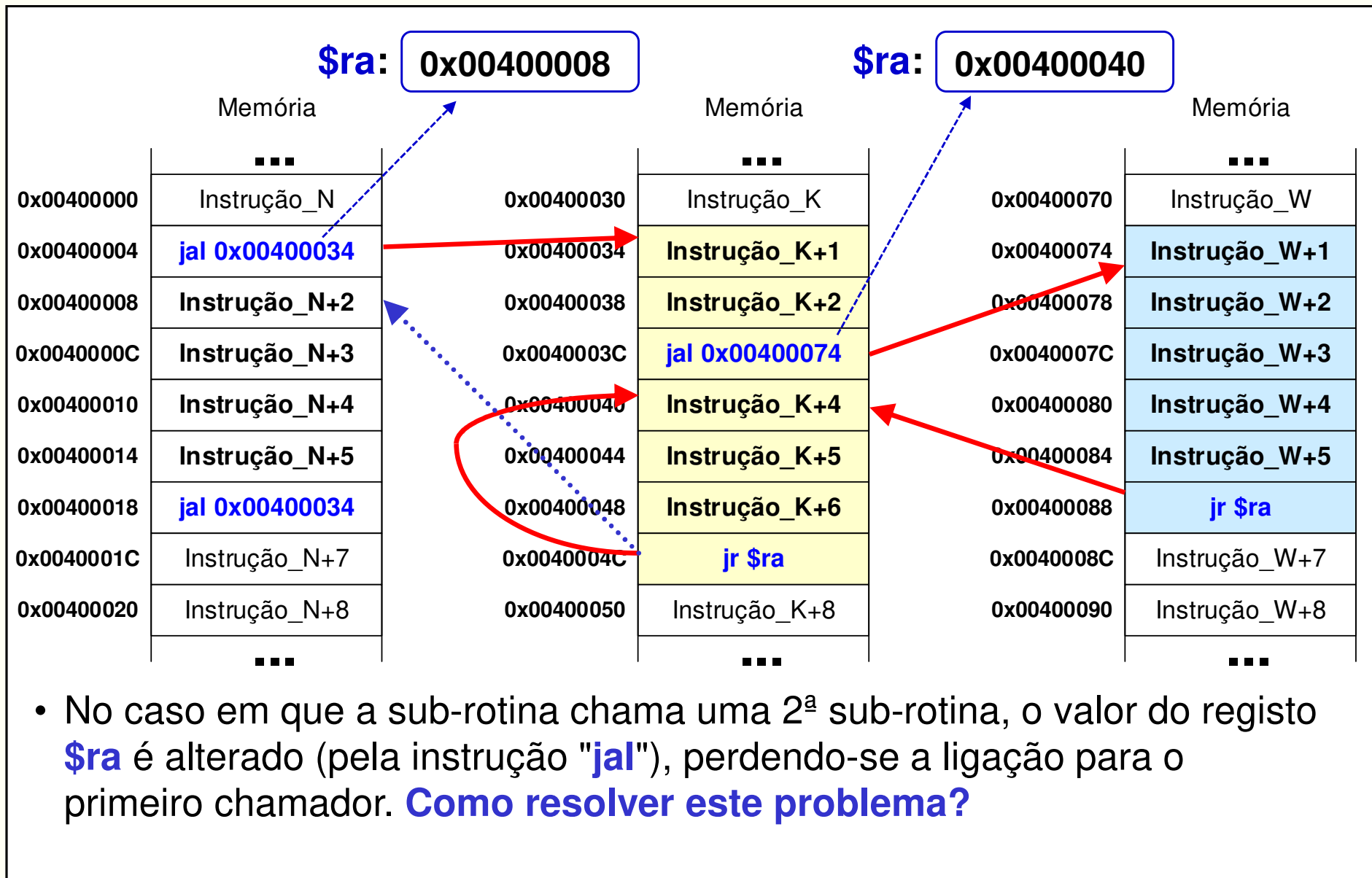
A próxima instrução a ser executada está no endereço **0x00400030**

Chamada a uma sub-rotina a partir de outra sub-rotina

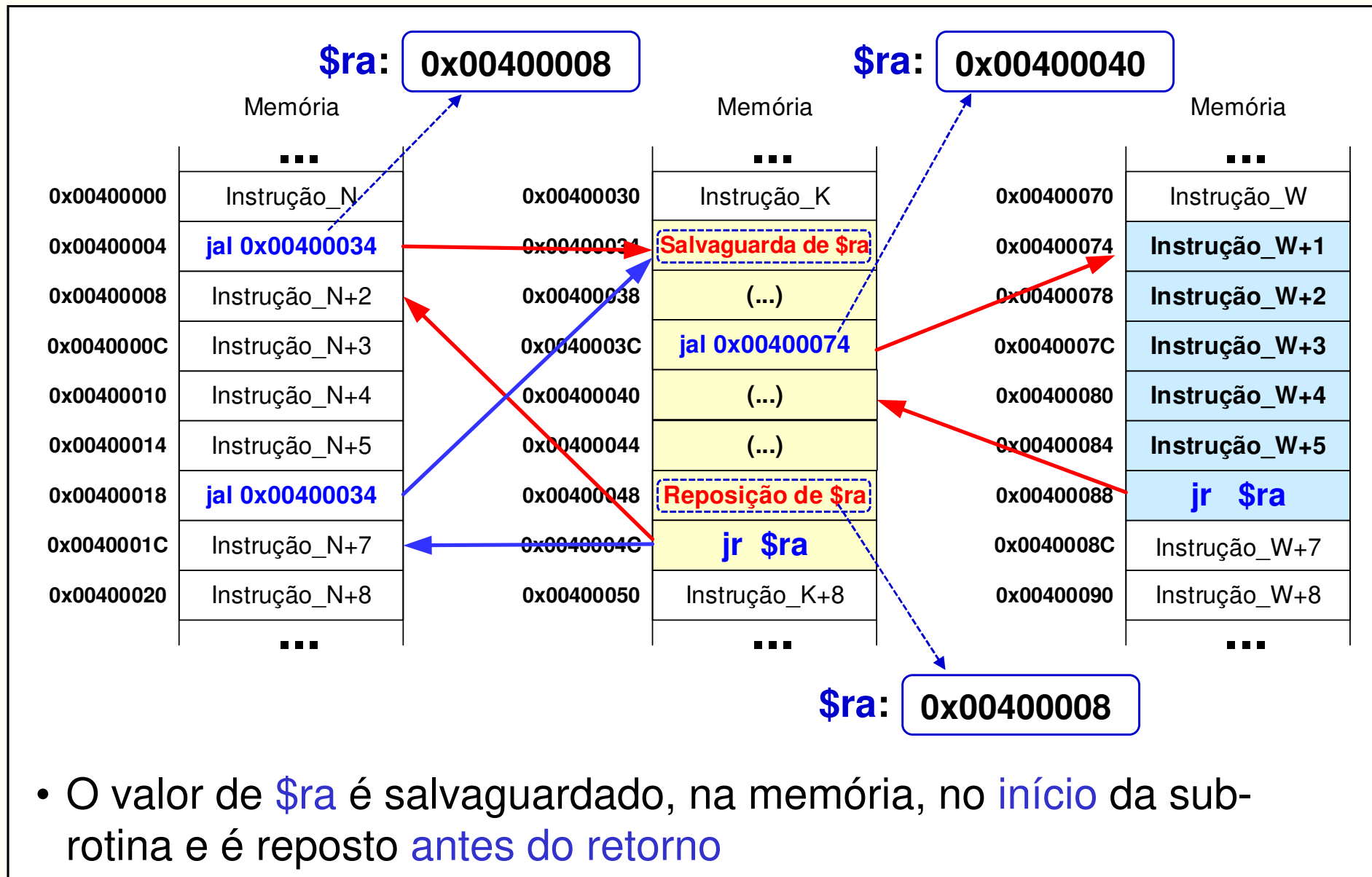


E se a sub-rotina (Instrução_K+1 a “jr \$ra”) chamar uma 2ª sub-rotina?

Chamada a uma sub-rotina a partir de outra sub-rotina



Chamada a uma sub-rotina a partir de outra sub-rotina



Instruções JAL e JALR

- A instrução "**jal**" é codificada do mesmo modo que a instrução "**j**": formato j em que os 26 bits menos significativos são obtidos dos 28 bits menos significativos do endereço-alvo, deslocados à direita dois bits
- Durante a execução, a obtenção do endereço-alvo é feita do mesmo modo que na instrução "**j**"
- A especificação de um endereço-alvo de 32 bits é possível através da utilização da instrução "**jalr**" (**jump and link register**)
- A instrução "**jalr**" funciona de modo idêntico à instrução "**jal**", exceto na obtenção do endereço-alvo:
 - o endereço da sub-rotina é lido do registo especificado na instrução (endereçamento indireto por registo); ex: **jalr \$t2**
- A instrução "**jalr**" é codificada com o formato R

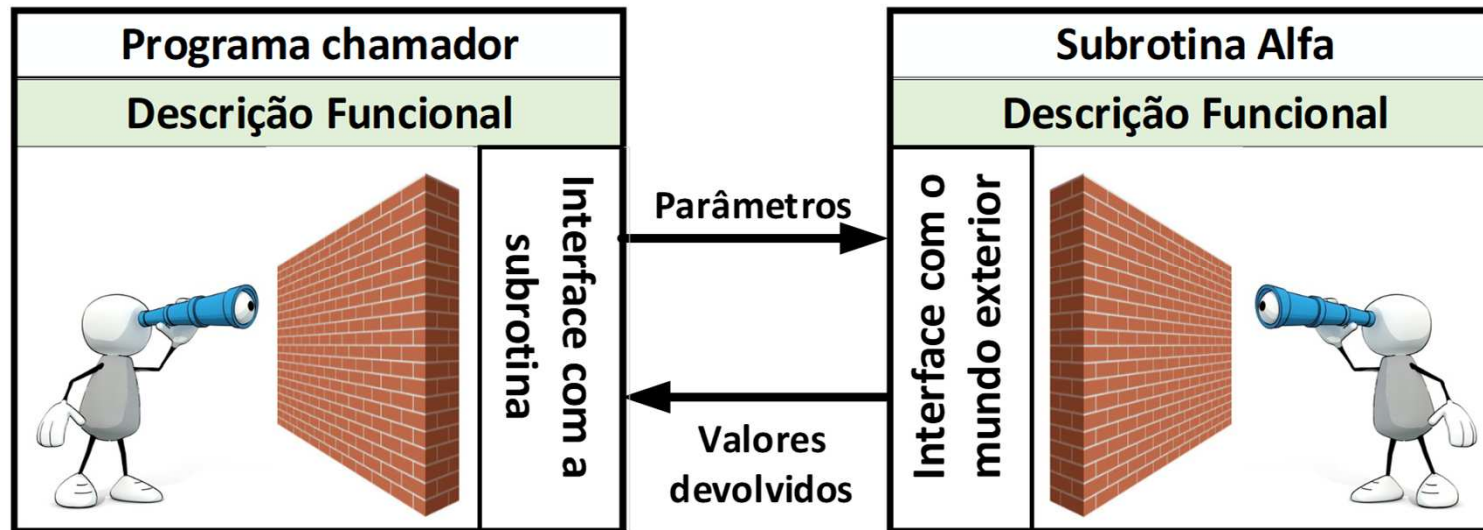
Sub-rotinas

- A **reutilização de sub-rotinas** é essencial em programação, em especial quando suportam funcionalidades básicas, quer do ponto de vista computacional como do ponto de vista do interface entre o computador, os periféricos e o utilizador humano
- As sub-rotinas surgem frequentemente agrupadas em **bibliotecas**, a partir das quais podem ser evocadas por qualquer programa
- A utilização de sub-rotinas escritas por outros para serviço dos nossos programas, **não deverá implicar o conhecimento dos detalhes da sua implementação**
- Geralmente, o acesso ao código fonte da sub-rotina (conjunto de instruções originalmente escritas pelo programador) não é sequer possível, a menos que o mesmo seja tornado público pelo seu autor

Sub-rotinas

- Na perspectiva do programador, a sub-rotina que este tem a responsabilidade de escrever é um **trecho de código isolado**, com uma funcionalidade bem definida, e com uma interface que ele próprio pode determinar em função das necessidades
- O facto de uma sub-rotina ser escrita para poder ser reutilizada implica que o programador não conhece antecipadamente as características do programa que a irá chamar
- Torna-se óbvia a necessidade de definir um conjunto de **regras que regulem a relação entre o programa “chamador” e a sub-rotina “chamada”**:
 - definição da interface entre ambos, i.e., quais os parâmetros de entrada e como os passar para a sub-rotina e como devolver resultados ao programa chamador
 - princípios que assegurem uma “sã convivência” entre os dois, de modo a que um não destrua os dados do outro

Sub-rotinas

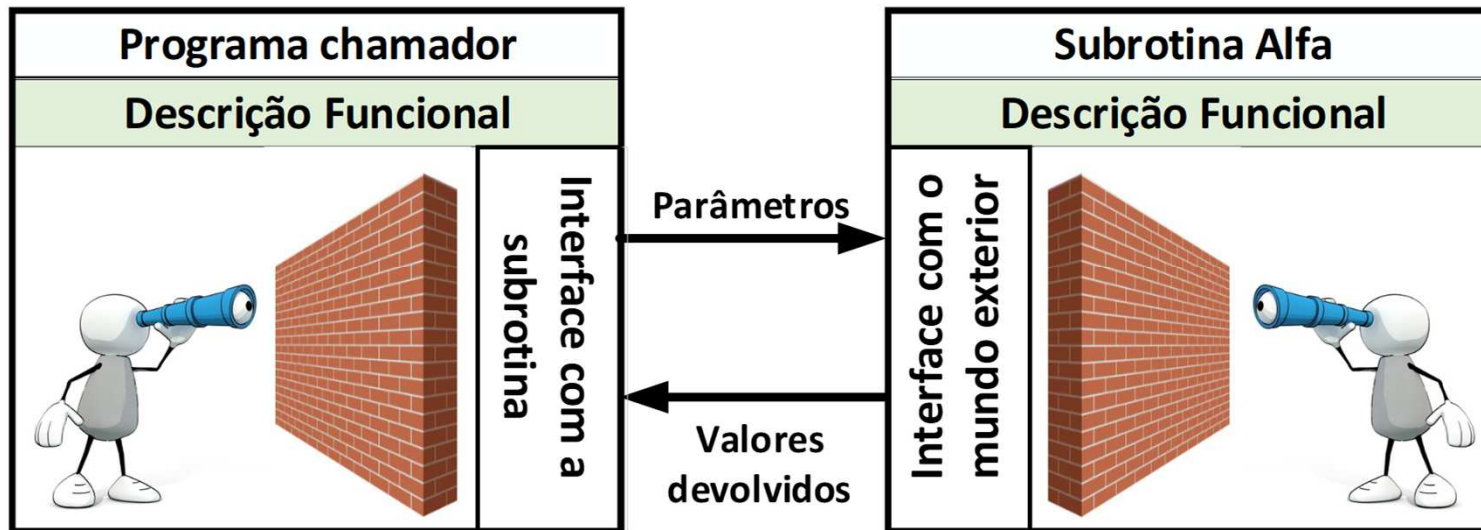


Exemplo (Programa chamador)

```
...  
li      $t0, 0  
lab1:   bge    $t0, 5, endf1  
...  
jal     sub1  
...  
addi    $t0, $t0, 1  
j       lab1  
endf1:  ...
```

Quantas vezes vai ser executado o ciclo do programa chamador?

Sub-rotinas



Exemplo (Programa chamador)

```

...
li      $t0, 0
lab1:   bge      $t0, 5, endf1
...
jal     sub1
...
addi    $t0, $t0, 1
j       lab1
endf1:  ...
    
```

(Sub-rotina)

```

sub1:   li      $t0, 3
lab2:   ble      $t0, 0, endf2
...
        addi    $t0, $t0, -1
        j       lab2
endf2:  jr      $ra
    
```

Quantas vezes vai ser executado o ciclo do programa chamador?

Regras a definir entre chamador e a sub-rotina chamada

- Ao nível da interface:
 - Como **passar parâmetros** do “chamador” para a sub-rotina, identificar quantos e onde são passados
 - Como **devolver**, para o “chamador”, resultados produzidos pela sub-rotina
- Ao nível das regras de “sã convivência”:
 - Que registos do CPU podem “chamador” e sub-rotina usar, sem que haja alteração indevida de informação por parte da sub-rotina (por exemplo a sub-rotina alterar o conteúdo de um registo que é usado pelo chamador e que tem informação que não pode ser perdida)
 - Como partilhar a memória usada para armazenar dados, sem risco de sobreposição (e consequente perda de informação armazenada)

Convenções do MIPS (passagem e devolução de valores)

- Os parâmetros que possam ser armazenados na dimensão de um registo (32 bits, i.e., **char**, **int**, **ponteiros**) devem ser passados à sub-rotina nos registos **\$a0 a \$a3** (\$4 a \$7) por esta ordem
 - o **primeiro parâmetro sempre em \$a0**, o **segundo em \$a1** e assim sucessivamente
- *Caso o número de parâmetros a passar seja superior a quatro, os 4 primeiros são passados nos registos \$ai e os restantes (pela ordem em que são declarados) deverão ser passados na stack*
- A sub-rotina pode devolver um valor de 32 bits ou um de 64 bits:
 - Se o valor a devolver é de **32 bits** é utilizado o registo **\$v0**
 - Se o valor a devolver é de **64 bits**, são utilizados os registos **\$v1 (32 bits mais significativos) e \$v0 (32 bits menos significativos)**

Exemplo (chamador)

```
int max(int, int);
void main(void)
{
    int val1=19;
    int val2=35;
    int maxVal;
    ...
    maxVal=max(val1, val2);
    print_int10(maxVal);
}
```

parâmetros passados em \$a0 e \$a1

chamada da sub-rotina

valor devolvido em \$v0

```
val1:    $t2
val2:    $t3
maxVal:  $a0
```

```
.text
main:   (...)  #Salvaguarda $ra
        li     $t2, 19
        li     $t3, 35
        ...
        move   $a0, $t2
        move   $a1, $t3
        jal    max
        move   $a0, $v0
        li     $v0, 1
        syscall
        (...)  #Repõe $ra
        jr     $ra
```

- Para escrever o programa “chamador”, não é necessário conhecer os detalhes de implementação da sub-rotina

Exemplo (sub-rotina)

```
int max(int a, int b)
{
    int vmax = a;

    if(b > vmax)
        vmax = b;
    return vmax;
}
```

vmax: \$t0

Em Assembly:

regresso ao chamador

Valor a devolver

parâmetros

```
max:  move    $t0, $a0
      ble     $a1, $t0, endif
      move    $t0, $a1
endif: move    $v0, $t0
      jr      $ra
```

- Para escrever o código da sub-rotina, não é necessário conhecer os detalhes de implementação do “chamador”
- Será necessário salvaguardar o valor de \$ra?

Estratégias para a salvaguarda de registos

- Que registos pode usar uma sub-rotina, sem que se corra o risco de que os mesmos registos estejam a ser usados pelo programa “chamador”, potenciando assim a destruição de informação vital para a execução do programa como um todo?
- Uma hipótese seria dividir, de forma estática, os registos existentes entre “chamador” e “chamado”!
 - Nesse caso, o que fazer quando o “chamado” é simultaneamente “chamador” (sub-rotina que chama outra sub-rotina)?
- Outra hipótese consiste em atribuir a um dos “parceiros” a responsabilidade de copiar previamente para a memória externa o conteúdo de qualquer registo que pretenda utilizar (**salvaguardar o registo**) e repor, posteriormente, o valor original lá armazenado
 - Essa responsabilidade pode ser atribuída ao chamador ou à sub-rotina (ou aos dois)

Estratégias para a salvaguarda de registos

- Estratégia “**caller-saved**”
 - Deixa-se ao cuidado do programa “chamador” a responsabilidade de salvaguardar o conteúdo da totalidade dos registos antes de chamar a sub-rotina
 - Cabe-lhe também a tarefa de repor posteriormente o seu valor
 - No limite, é admissível que o “chamador” salvaguarde apenas os registos de cujo conteúdo venha a precisar mais tarde
- Estratégia “**callee-saved**”
 - Entrega-se à sub-rotina a responsabilidade pela prévia salvaguarda dos registos que vai usar
 - Assegura, igualmente, a tarefa de repor o seu valor imediatamente antes de regressar ao programa “chamador”

Convenção para salvaguarda de registros no MIPS

- Os registros **\$t0** a **\$t9**, **\$v0** e **\$v1**, e **\$a0** a **\$a3** podem ser livremente utilizados e alterados pelas sub-rotinas
- Os registros **\$s0** a **\$s7** não podem, **na perspectiva do chamador**, ser alterados pelas sub-rotinas
 - Se uma dada sub-rotina precisar de usar qualquer um dos registros **\$s0** a **\$s7** compete a essa sub-rotina **salvaguardar previamente o seu conteúdo**, repondo-o imediatamente antes de terminar
 - Ou seja, é seguro para o programa chamador usar um registro **\$sn** para armazenar um valor que vai necessitar após a chamada à sub-rotina, uma vez que tem a garantia que esta não o modifica

Considerações práticas sobre a utilização da convenção

- **sub-rotinas terminais** (sub-rotinas folha, i.e., que não chamam qualquer sub-rotina)
 - Só devem utilizar registos que não têm a responsabilidade de salvar guardar (**\$t0..\$t9**, **\$v0..\$v1** e **\$a0..\$a3**)
- **sub-rotinas intermédias** (sub-rotinas que chamam outras sub-rotinas)
 - Devem utilizar os registos **\$s0..\$s7** para o armazenamento de valores que pretendam preservar durante a chamada à sub-rotina seguinte
 - A utilização de qualquer um dos registos **\$s0** a **\$s7** implica a sua prévia salvaguarda na memória externa logo no início da sub-rotina e a respetiva reposição no final
 - Devem utilizar os registos **\$t0..\$t9**, **\$v0..\$v1** e **\$a0..\$a3** para os restantes valores

Utilização da convenção - exemplo

- O problema detetado na codificação do programa chamador e da sub-rotina dos slides 13 e 14 pode facilmente ser resolvido se a convenção de salvaguarda de registos for aplicada

O código da sub-rotina é desconhecido do programador do “chamador” e vice-versa

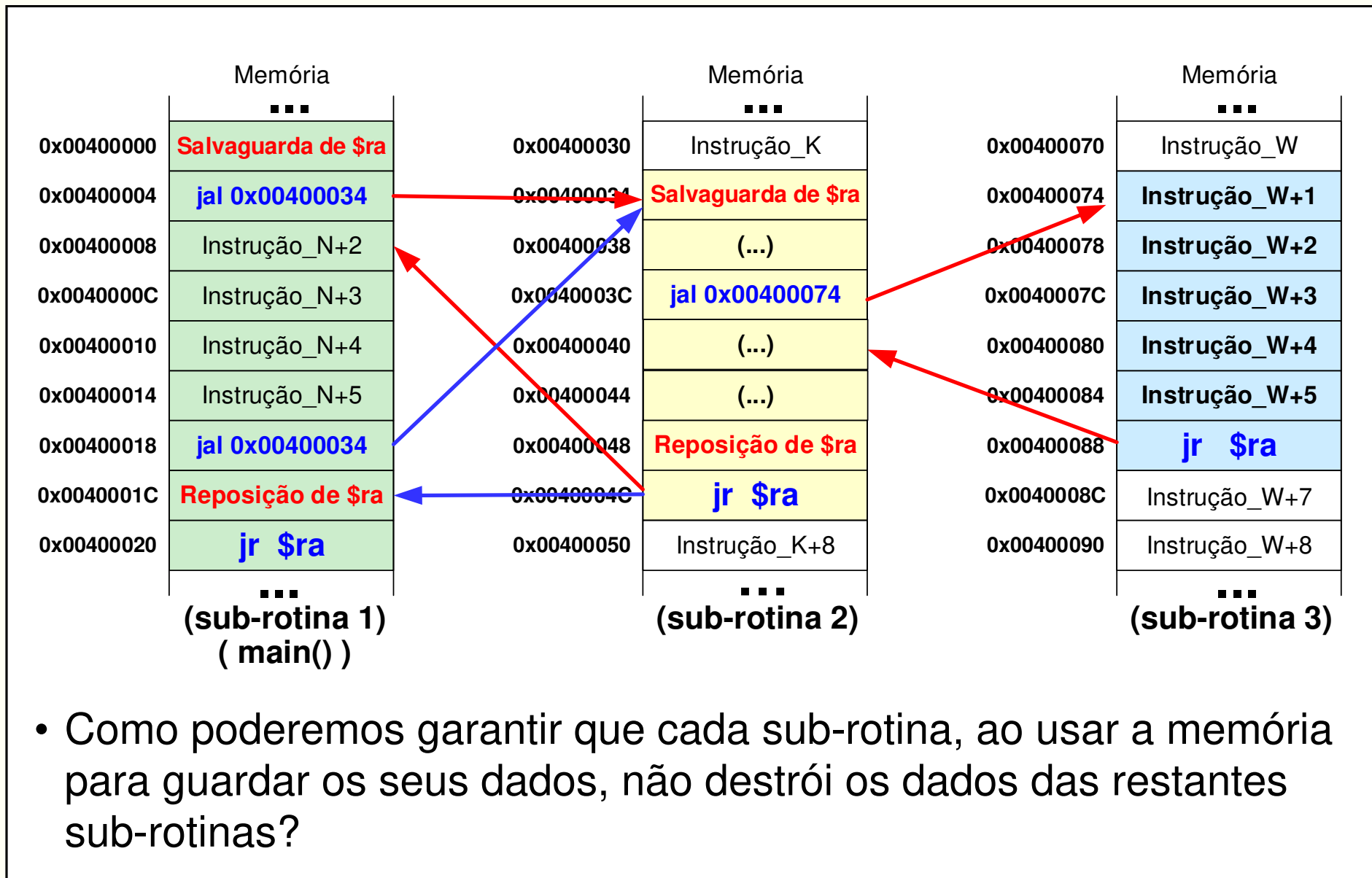
```
(...) # Salv. $s0
...
li      $s0, 0
lab1:   bge    $s0, 5, endf1
...
jal     sub1
...
addi    $s0, $s0, 1
j       lab1
endf1:  ...
(...) # Repoe $s0
```

```
sub1:   li      $t0, 3
lab2:   ble     $t0, 0, endf2
...
addi    $t0, $t0, -1
j       lab2
endf2:  jr      $ra
```

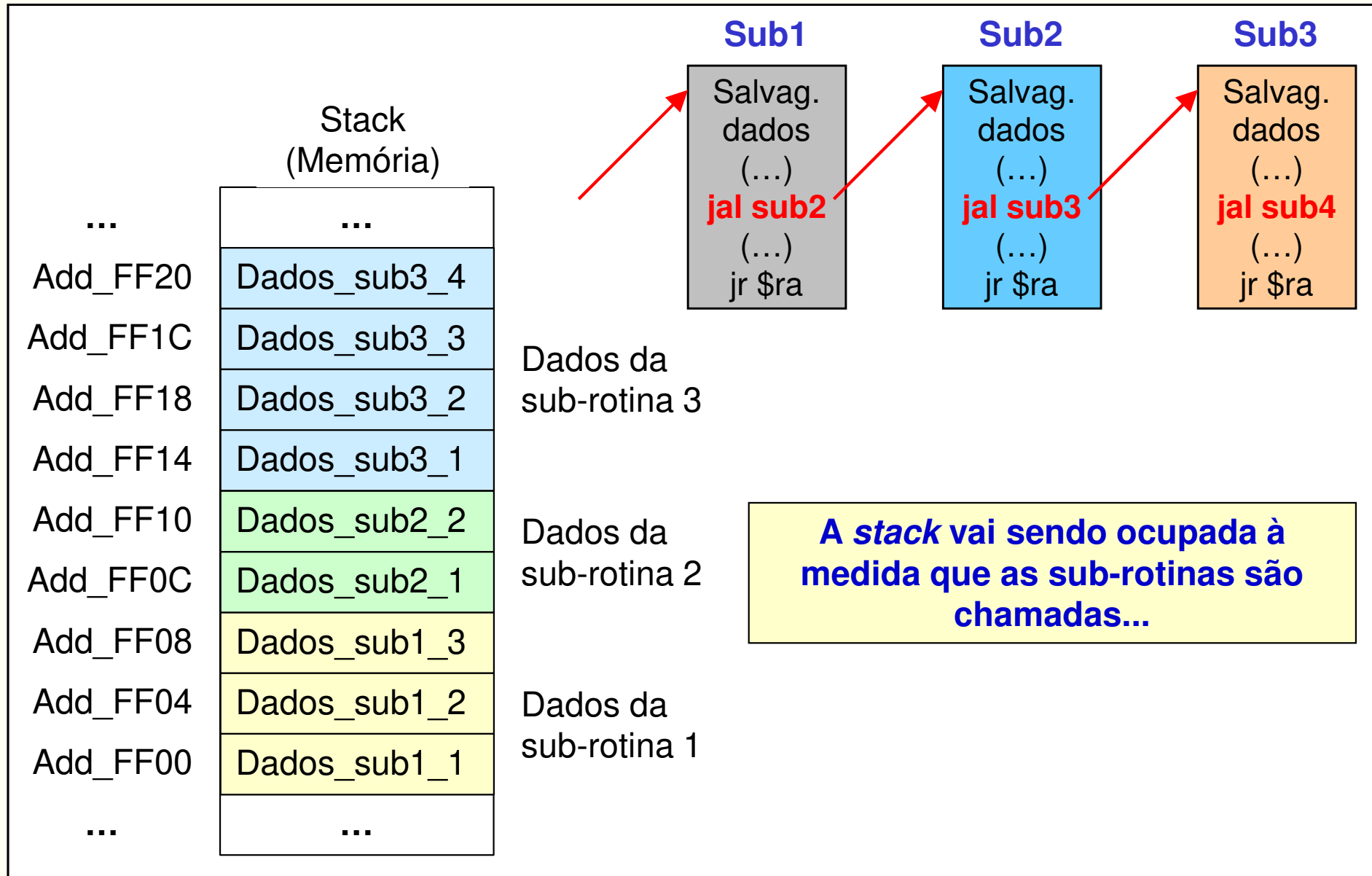
Quantas vezes vai ser executado o ciclo do programa chamador?

- A variável de controlo do ciclo do chamador deverá residir num registo **\$sn** (por exemplo no \$s0) – registo que, **garantidamente**, a sub-rotina não vai alterar

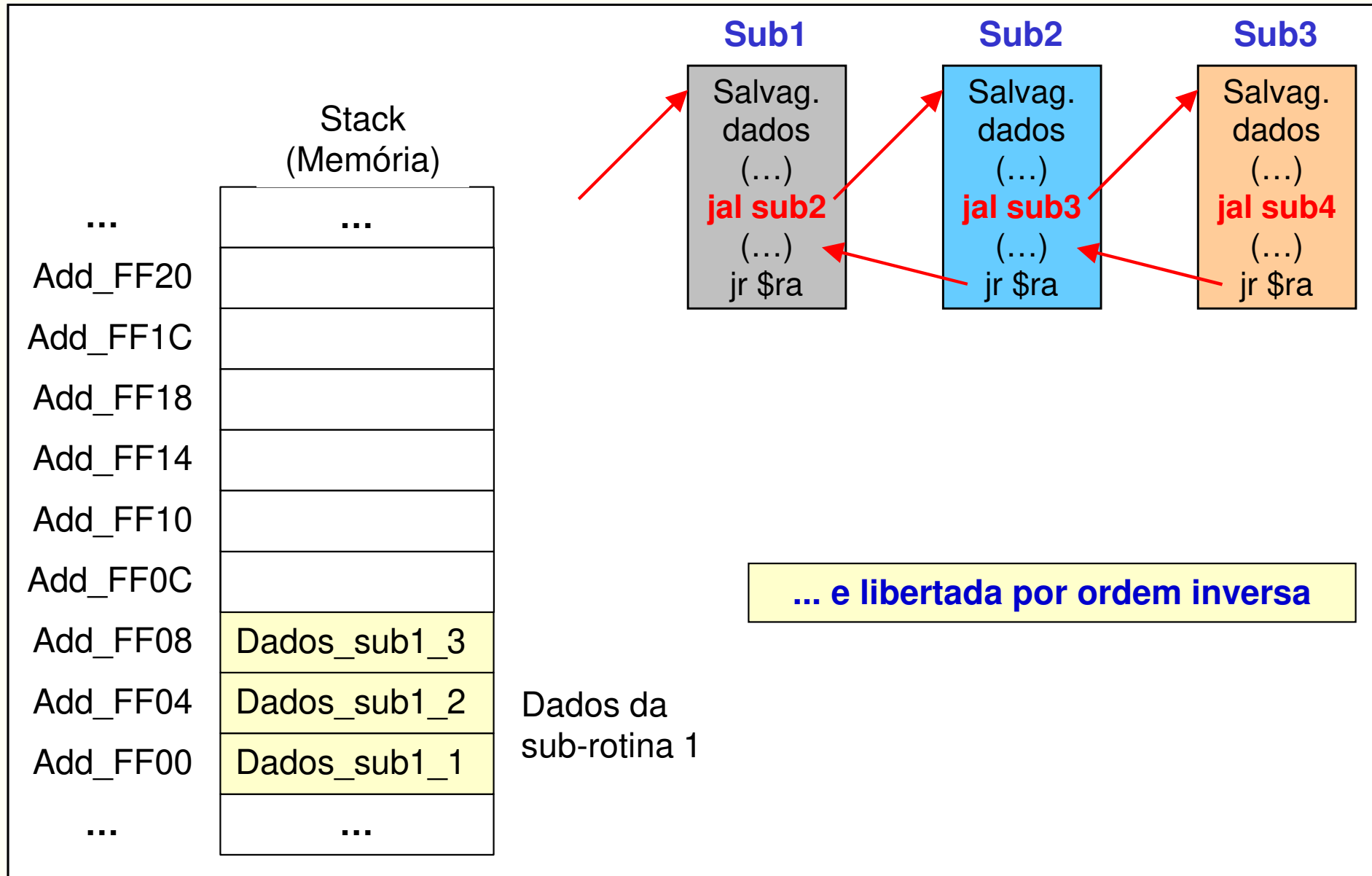
Armazenamento temporário de informação



Stack: espaço de armazenamento temporário



Stack: espaço de armazenamento temporário

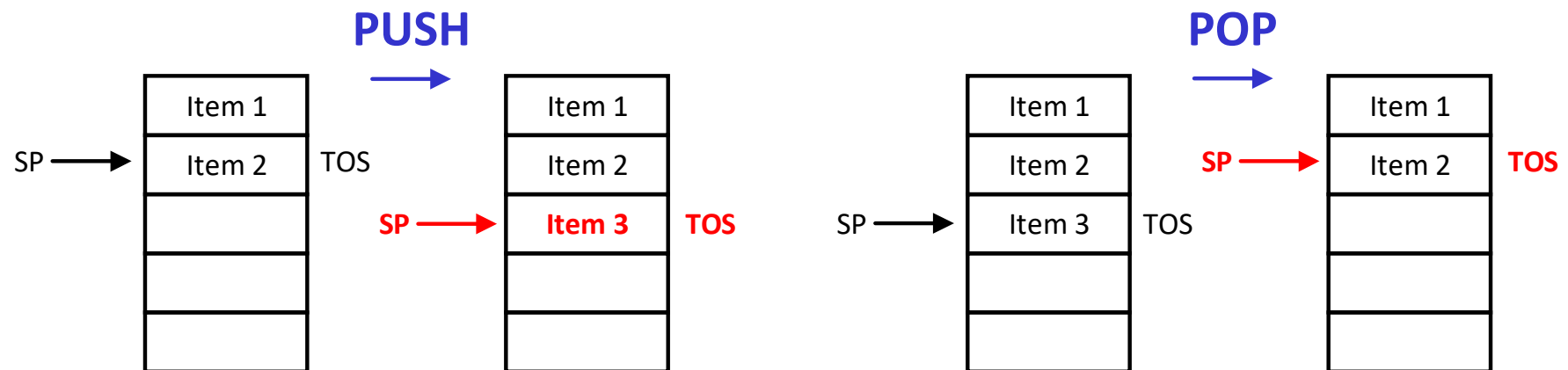


Stack: espaço de armazenamento temporário

- A estratégia de gestão dinâmica do espaço de memória - em que a última informação acrescentada é a primeira a ser retirada – é designada por **LIFO** (*Last In First Out*)
- A estrutura de dados correspondente é conhecida por **stack** ("pilha")
- As *stacks* são de tal forma importantes que muitas arquiteturas suportam diretamente instruções específicas para a sua manipulação (por exemplo a arquitetura Intel x86)
- A operação que permite acrescentar informação à *stack* é normalmente designada por **PUSH**, enquanto que a operação inversa é conhecida por **POP**

Stack: operações *push* e *pop*

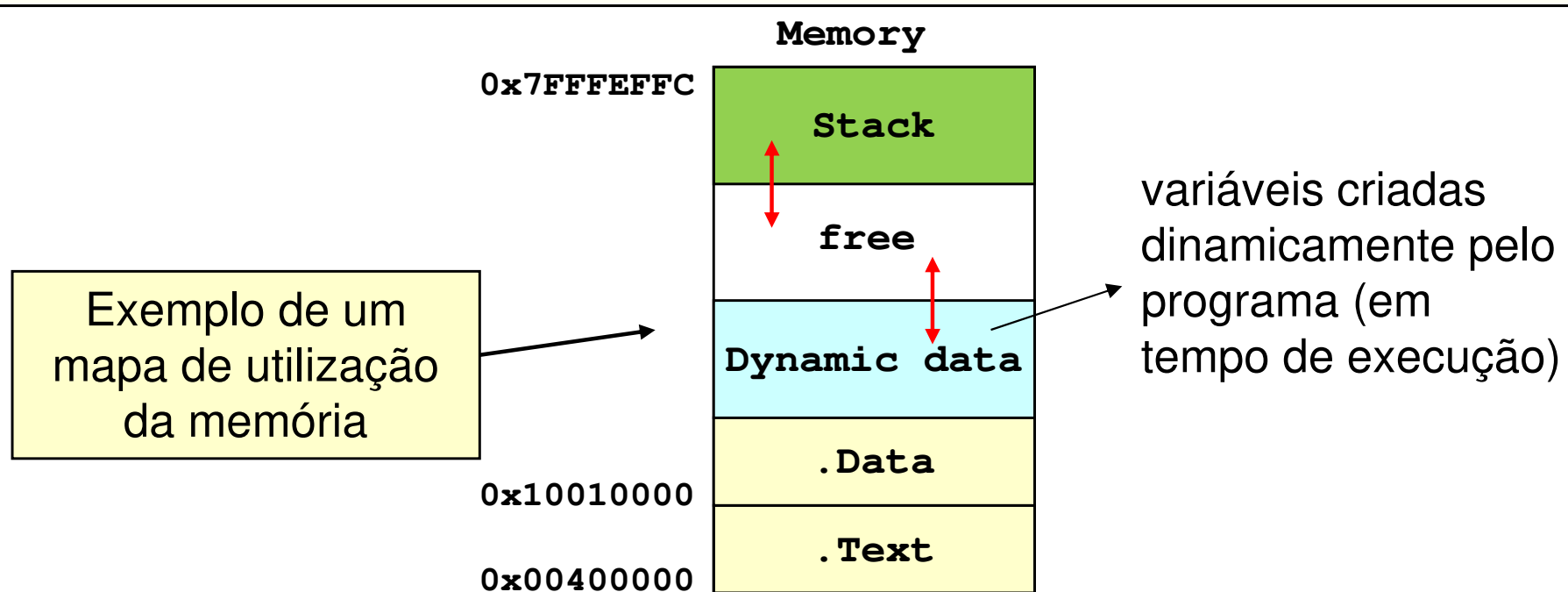
- Estas operações têm associado um registo designado por **Stack Pointer (SP)**
- O registo **Stack Pointer** mantém, de forma permanente, o **endereço do topo da stack (TOS - top of stack)** e aponta sempre **para o último endereço ocupado**
 - Numa operação de **PUSH** é necessário pré-atualizar o *stack pointer* antes de copiar informação para a *stack*
 - Numa operação de **POP** é feita uma leitura da *stack*, do endereço atual do *stack pointer*, seguida de atualização do valor do *stack pointer*



Atualização do *stack pointer*

- A atualização do ***stack pointer***, numa operação de *push* (escrita de informação), pode seguir uma de duas estratégias:
 - Ser incrementado, fazendo crescer a *stack* no sentido crescente dos endereços
 - Ser decrementado, fazendo crescer a *stack* no sentido decrescente dos endereços
- A estratégia de crescimento da *stack* no sentido dos endereços mais baixos é, geralmente, a adotada
- A estratégia de crescimento da *stack* no sentido dos endereços mais baixos permite uma gestão simplificada da fronteira entre os segmentos de dados e de *stack*

Atualização do *stack pointer*



- **Text** (code segment): instruções do programa
- **Data**: dados inicializados e não inicializados do programa (variáveis globais, e variáveis declaradas dentro de funções como *static*)
- **Dynamic data (heap)**: variáveis criadas e eliminadas dinamicamente pelo programa (e.g. funções `malloc()` e `free()` da linguagem C)
- **Stack**: variáveis locais das funções (não declaradas como *static*); endereço de retorno das sub-rotinas

Regras de utilização da *stack* na arquitetura MIPS

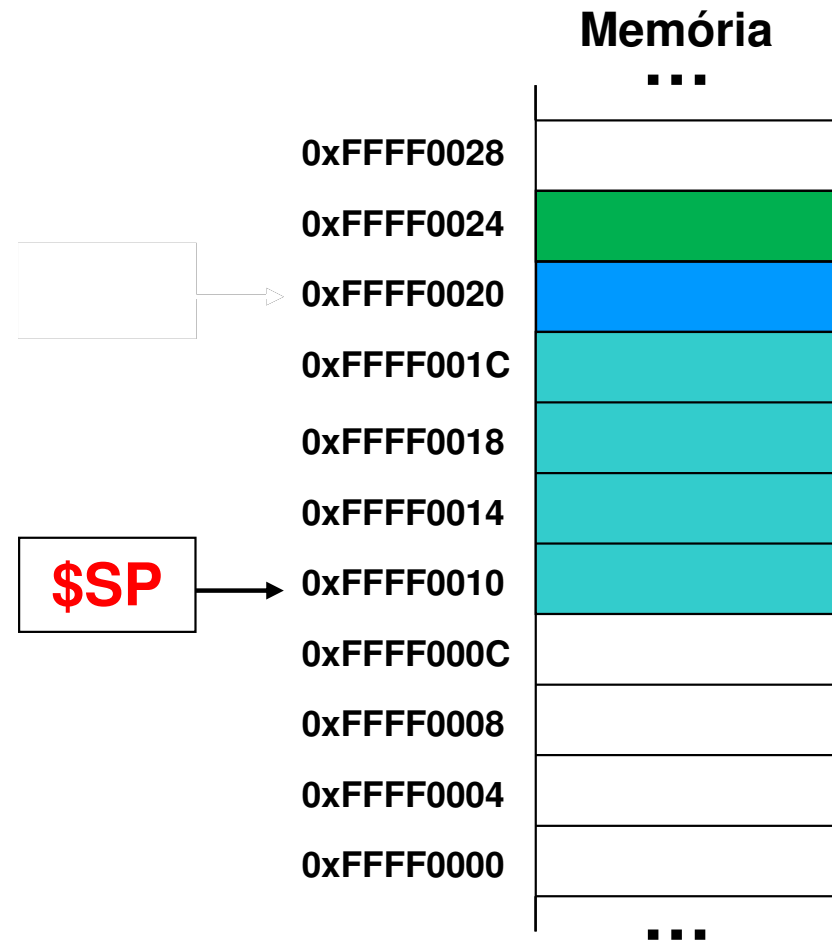
1. O registo **\$sp** (*stack pointer*) contém o endereço da **última posição ocupada** da *stack*

\$sp = \$29

\$SP: 0xFFFF0010

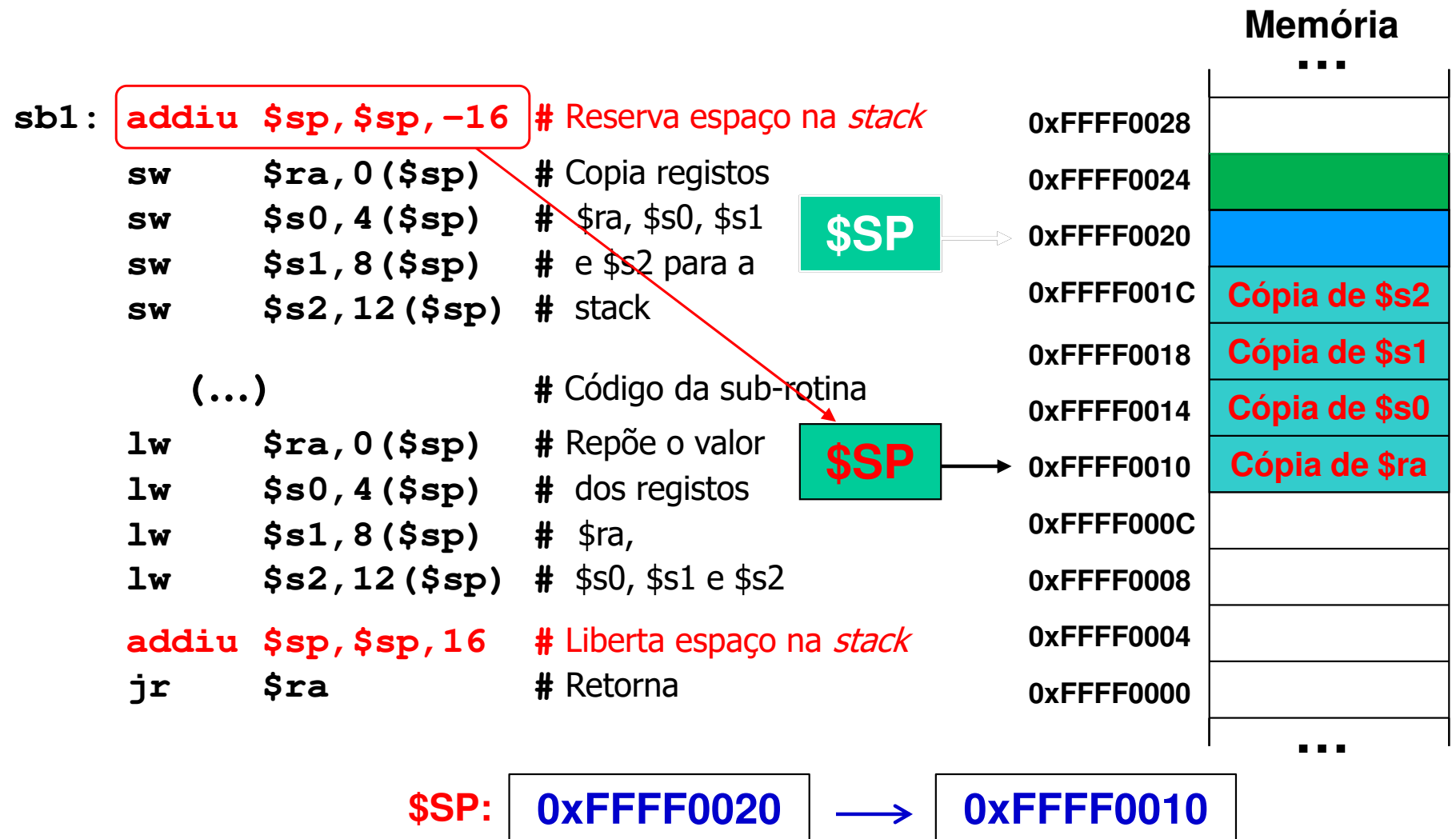
2. A *stack* **cresce** no **sentido decrescente** dos endereços da memória

- ### 3. A *stack* está organizada em words de 32 bits



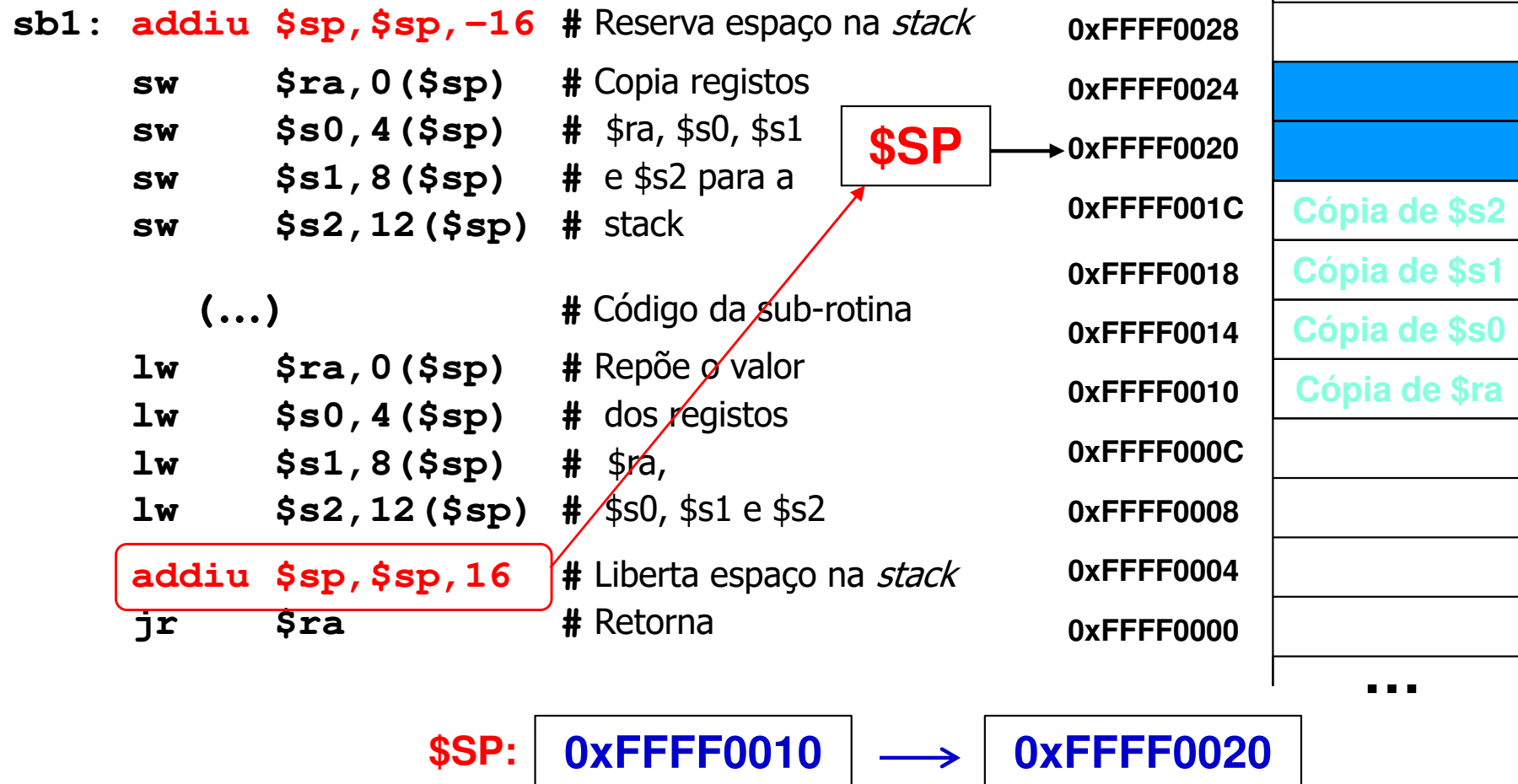
Regras de utilização da *stack* na arquitetura MIPS

- Exemplo (salvaguarda de 4 registos)



Regras de utilização da *stack* na arquitetura MIPS

- Exemplo (salvaguarda de 4 registos)



Regras de utilização da *stack* na arquitetura MIPS

- Exemplo

Prólogo

```
sb1: addiu $sp, $sp, -16 # Reserva espaço na stack
      sw    $ra, 0($sp)  # Copia registos
      sw    $s0, 4($sp)  # $ra, $s0, $s1
      sw    $s1, 8($sp)  # e $s2 para a
      sw    $s2, 12($sp) # stack
```

\$SP

(...)

Código da sub-rotina

```
      lw    $ra, 0($sp) # Repõe o valor
      lw    $s0, 4($sp) # dos registos
      lw    $s1, 8($sp) # $ra,
      lw    $s2, 12($sp) # $s0, $s1 e $s2
      addiu $sp, $sp, 16 # Liberta espaço na stack
      jr    $ra         # Retorna
```

Epílogo

Memória

0xFFFF0028

0xFFFF0024

0xFFFF0020

0xFFFF001C

0xFFFF0018

0xFFFF0014

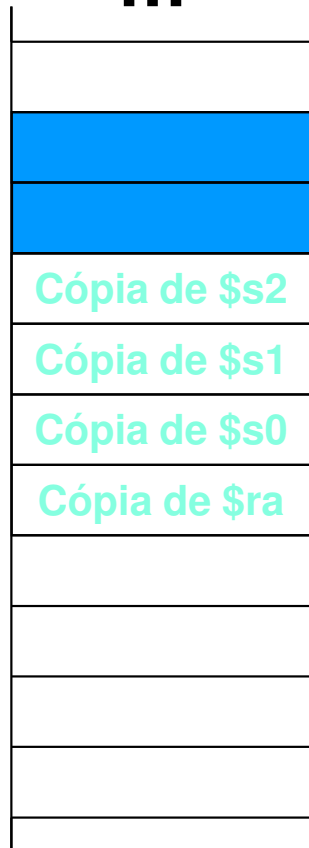
0xFFFF0010

0xFFFF000C

0xFFFF0008

0xFFFF0004

0xFFFF0000



Análise de um exemplo completo

Considere-se o seguinte código C:

```
int soma(int *, int);
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
    static int temp[100]; // reside em memória
```

```
    int result;
```

```
    ...                // código de inicialização do array
```

```
    result = soma(temp, 100);
```

```
    print_int10(result); // syscall
```

```
}
```

Declaração de um *array static*
(reside no “data segment”)

Declaração de uma variável
inteira (pode residir num registo
interno)

Afixação do resultado
no ecrã

Chamada de uma função e
atribuição do valor devolvido à
variável inteira

Análise de um exemplo completo

```
int soma(int *, int);

void main(void)
{
    static int temp[100]; //reside em memória
    int result;
    ...                // código de inicialização do array
    result = soma(temp, 100);
    print_int10(result); // syscall
}
```

- A função **main()** é uma função intermédia (chama a função **soma()**); **registo \$ra** tem que ser salvaguardado
- A variável "**result**" não tem atribuído qualquer valor que seja necessário depois da chamada à função **soma()**; **deve residir num registo \$tn, \$vn ou \$an** (pode ser usado **\$t0**)

Código correspondente em *Assembly* do MIPS

```
# result: $t0
#
```

```
        .data
temp:    .space 400

        .eqv    print_int10, 1
        .text
        .globl  main
main:    addiu    $sp, $sp, -4
        sw       $ra, 0($sp)
        la       $a0, temp
        li       $a1, 100
        jal      soma
        move     $t0, $v0
        move     $a0, $t0
        li       $v0, print_int10
        syscall
        lw       $ra, 0($sp)
        addiu    $sp, $sp, 4
        jr       $ra
```

```
void main(void) {
    static int temp[100];
    int result;
    result = soma(temp, 100);
    print_int(result);
}
```

```
# Reserva de espaço p/ o array
# (100 words => 400 bytes)
#
# Reserva espaço na stack
# Salvaguarda o registo $ra
# inicialização dos registos
# que vão passar os parâmetros
# soma(temp, 100)
# result = soma(temp, 100)
#
# print_int(result)
# Recupera o valor do reg. $ra
# Liberta espaço na stack
# Retorno
```

Código da função soma()

```
int  soma (int *array, int n)
{
    int i, res;
    for (i = 0, res = 0; i < n; i++)
    {
        res = res + array[i];
    }
    return res;
}
```

Esta função recebe dois parâmetros (um ponteiro para inteiro e um inteiro) e calcula o seguinte resultado:

$$\text{res} = \sum_{i=0}^{n-1} (\text{array}[i])$$

A mesma função usando ponteiros:

```
int  soma (int *array, int n)
{
    int res = 0;
    int *p = array;
    for (; p < &(array[n]); p++) // ou: ; p < (array + n);
    {
        res += (*p);
    }
    return res;
}
```

Código da função soma() usando ponteiros:

```
int  soma (int *array, int n)
{
    int res = 0;
    int *p = array;
    for (; p < &(array[n]); p++)
    {
        res += (*p);
    }
    return res;
}
```

- A função **soma ()** é uma **função terminal**:
 - não é necessário salvar **\$ra**
 - só devem ser usados registros **\$t_n**, **\$v_n** ou **\$a_n**

Código correspondente em *Assembly* do MIPS

- Versão com ponteiros

```
# res:    $v0
# p:      $t1
# array:  $a0
# n:      $a1
#
```

```
soma:  li      $v0, 0           # res = 0;
       move    $t1, $a0        # p = array;
       sll     $a1, $a1, 2      # n *= 4;
       addu    $a0, $a0, $a1    # $a0 = array + n;
for:   bgeu    $t1, $a0, endf   # while(p < &(array[n])){
       lw      $t2, 0($t1)      #
       add     $v0, $v0, $t2    #     res = res + (*p);
       addiu   $t1, $t1, 4      #     p++;
       j       for             # }
endf:  jr      $ra             # return res;
```

```
int  soma (int *array, int n)
{
    int res = 0;
    int *p = array;
    for (; p < &(array[n]); p++)
        res += (*p);
    return res;
}
```

A sub-rotina não chama nenhuma outra e não são usados registos **\$sn**, pelo que não é necessário salvar qualquer registo

Código de uma função para cálculo da média

```
int media (int *array, int n)
{
    int res;

    res = soma(array, n);
    return res / n;
}
```

- A função `media()` é uma **função intermédia**:
 - é necessário **salvar \$ra**
- O valor da variável "`res`" só é definido após a chamada à função; deve residir num registo de utilização livre, por exemplo `$t0`
- O número de elementos do `array` "`n`" (`$a1`), é necessário após a chamada à função `soma()`; **o registo `$a1` tem que ser copiado para um registo `$sn`** (por exemplo `$s1`)

Exemplo – função para cálculo da média

```
int media (int *array, int n)
{
    int res;
    res = soma(array, n);
    return res / n;
}
```

chama função soma()

Valor de *n* é necessário depois de chamada a função “soma”!

```
# res: $t0, array: $a0, n: $a1 -> $s1
```

```
media: addiu $sp,$sp,-8      # Reserva espaço na stack
       sw     $ra,0($sp)    # salvaguarda $ra e $s1
       sw     $s1,4($sp)    # guarda valor $s1 antes de o usar
       move   $s1,$a1       # "n" é necessário depois
                           # da chamada à função soma
       jal    soma          # soma(array,n);
       move   $t0,$v0       # res = soma(array,n);
       div    $v0,$t0,$s1   # res/n
       lw     $ra,0($sp)    # recupera valor de $ra
       lw     $s1,4($sp)    # e $s1
       addiu  $sp,$sp,8     # Liberta espaço na stack
       jr     $ra          # retorna
```

Questões

- O que é uma sub-rotina? Qual a instrução do MIPS usada para saltar para uma sub-rotina? Porque razão não pode ser usada a instrução "j"?
- Quais as operações realizadas, e relativa sequência, na execução de uma instrução "jal"? Qual o nome virtual e o número do registo associado à execução dessa instrução?
- No caso de uma sub-rotina ser simultaneamente chamada e chamadora (sub-rotina intermédia) que operações é obrigatório realizar nessa sub-rotina?
- Qual a instrução usada para retornar de uma sub-rotina? Que operação fundamental é realizada na execução dessa instrução?
- De acordo com a convenção de utilização de registos no MIPS:
 - Que registos são usados para passar parâmetros e para devolver resultados de uma sub-rotina?
 - Quais os registos que uma sub-rotina pode livremente usar e alterar sem necessidade de prévia salvaguarda?
 - Quais os registos que uma sub-rotina tem de preservar? Quais os registos que uma sub-rotina chamadora tem a garantia que a sub-rotina chamada não altera?
 - Em que situação devem ser usados registos **\$sn**? Em que situação devem ser usados os restantes: **\$tn**, **\$an** e **\$vn**?

Questões

- O que é a *stack*? Qual a utilidade do *stack pointer*?
- Como funcionam as operações de *push* e *pop*?
- Porque razão a *stack* cresce tipicamente no sentido dos endereços mais baixos?
- Quais as regras para a implementação em software de uma *stack* no MIPS? Qual o registo usado como *stack pointer*?
- De acordo com a convenção de utilização de registos do MIPS:
 - Que registos devem preferencialmente ser usados numa sub-rotina intermédia, para armazenar variáveis cujo tempo de vida inclui a chamada de sub-rotinas? Que cuidados se deve ter na utilização desses registos?
 - Que registos devem preferencialmente ser usados numa sub-rotina intermédia, para armazenar variáveis cujo tempo de vida não inclui a chamada de sub-rotinas?
 - Que registos devem preferencialmente ser usados numa sub-rotina terminal para armazenar variáveis?
- Para a função com o protótipo seguinte, indique, para cada um dos parâmetros de entrada e para o valor devolvido, qual o registo do MIPS usado para a passagem dos respetivos valores:

`char fun(int a, unsigned char b, char *c, int *d)`

Exercício

- Traduza para *assembly* do MIPS a seguinte função **fun1()**, aplicando a convenção de passagem de parâmetros e salvaguarda de registos:

```
char *fun2(char *, char);

char *fun1(int n, char *a1, char *a2)
{
    int j = 0;
    char *p = a1;

    do
    {
        if((j % 2) == 0)
            fun2(a1++, *a2++);
    } while(++j < n);

    *a1 = '\0';
    return p;
}
```