universidade de aveiro theoria poiesis praxis

Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática

Arquitectura de Computadores I

2º Ano, 1º semestre

Introdução à Arquitectura MIPS

Texto de apoio às aulas práticas da disciplina de Arquitectura de Computadores I

Índice

Pág.

Descrição da Arquitectura

Um processador MIPS é constituído por uma unidade de processamento de inteiros (o *CPU*) e vários coprocessadores que realizam tarefas subsidiárias ou operam sobre outros tipos de dados como sejam números em vírgula flutuante (Figura 1). O coprocessador de controlo de sistema (CP0) é responsável pela gestão de *traps*, excepções e pelo sistema de gestão da memória virtual. O coprocessador de vírgula flutuante (CP1), por sua vez, realiza operações aritméticas sobre números reais representados em vírgula flutuante no formato IEEE-754. O MARS [1]simula o funcionamento do CPU, do CP1 e das *traps* e excepções do CP0.

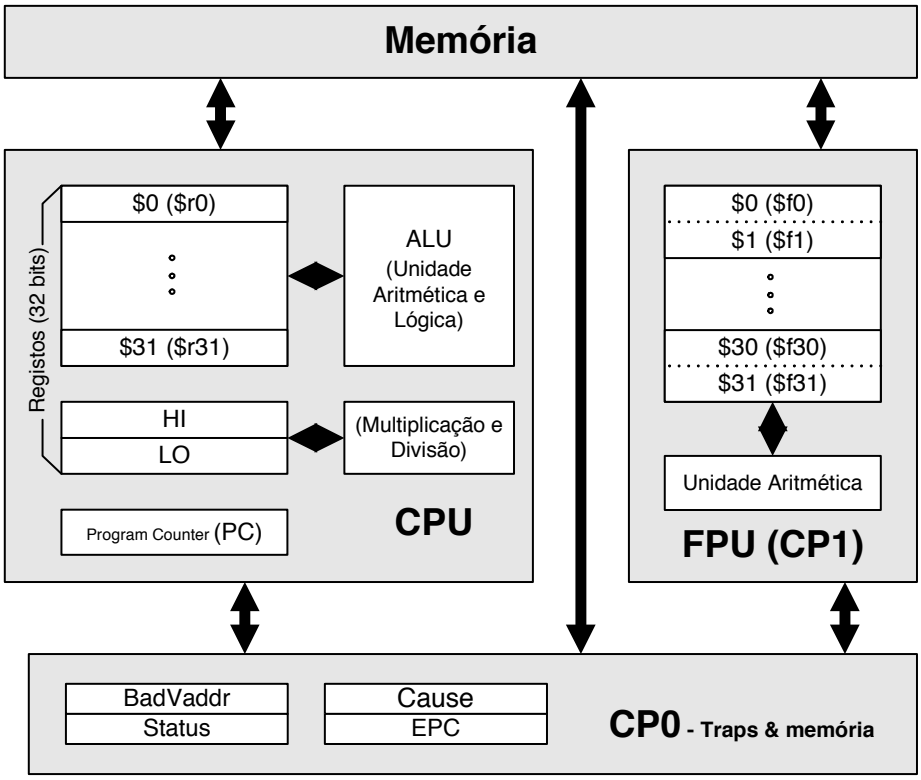


Figura 1 - Arquitectura simplificada do MIPS

Registos do *CPU*

A unidade de processamento central (*CPU*) do MIPS possui um *program counter* de 32 bits (**`PC`**), dois registos de 32 bits para armazenar os resultados de multiplicações e divisões inteiras (**`HI`** e **`LO`**) e 32 registos de uso geral de 32 bits, numerados de 0 a 31 (**`$0`** a **`$31`**). Dois destes registos, embora de uso geral, apresentam particularidades específicas: o registo **`$0`** contém sempre o valor 0 (*hardwired*) e o registo **`$31`** (*link register*) é usado pelas instruções de *Jump and Link* para armazenar o endereço de retorno na evocação de subrotinas. O MARS simula a existência e uso de todos estes registos.

[1] MARS - MIPS Assembler and Runtime Simulator (http://courses.missouristate.edu/KenVollmar/MARS/)

Relativamente à utilização, por parte dos programas *Assembly*, dos registos de uso geral, o MIPS estabeleceu um conjunto de regras ou convenções que devem ser seguidas pelos programadores. Embora estas convenções não correspondam a imposições do *hardware*, a sua adopção é fortemente recomendada, de forma a garantir que o código gerado funcione correctamente em outras plataformas. Com vista a facilitar o seguimento da convenção estabelecida pela MIPS, a cada um dos registos foi atribuído um nome lógico que evidencia o seu tipo de uso. Na Tabela I são identificados, para cada registo de uso geral, a correspondente designação lógica e o tipo de uso que lhe está destinado pela convenção.

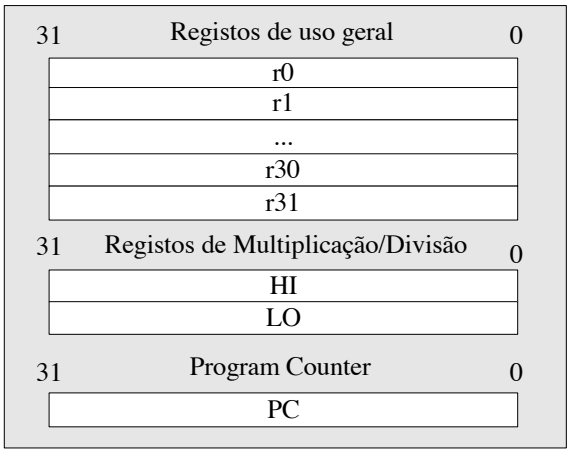


Figura 2 - Os registos do *CPU*

Nome Lógico	Nome Real	Uso
`$zero`	`$0`	Constante 0
`$at`	`$1`	Reservado pelo assemblador
`$v0..$v1`	`$2..$3`	Cálculo de expressões e valor de retorno das funções.
`$a0..$a3`	`$4..$7`	Primeiros 4 parâmetros das funções
`$t0..$t7`	`$8..$15`	Geral (pode não ser preservado pelas funções)
`$s0..$s7`	`$16..$23`	Geral (deve ser preservado pelas funções)
`$t8..$t9`	`$24..$25`	Geral (pode não ser preservado pelas funções)
`$k0..$k1`	`$26..$27`	Reservado pelo *kernel* do S.O.
`$gp`	`$28`	Ponteiro para área global (*Global Pointer*)
`$sp`	`$29`	*Stack Pointer*
`$fp`	`$30`	*Frame Pointer*
`$ra`	`$31`	Endereço de retornos das funções (*Return Address*)

Tabela I - Registos do MIPS e convenção de uso

Os registos **`$at`** (**`$1`**) e **`$k0-$k1`** (**`$26-$27`**) estão reservados para uso pelo assemblador e sistema operativo.

Os registos **`$a0-$a3`** (**`$4-$7`**) são usados para passar às subrotinas[2] os seus quatro primeiros parâmetros. Se for necessário passar mais do que quatro parâmetros os remanescentes deverão ser passados na *stack*.

Os registos **`$v0-$v1`** (**`$2-$3`**) são usados para armazenar temporariamente o resultado de expressões aritméticas ou lógicas ou para o retorno de valores das funções.

[2] Alguns compiladores, por forma a generalizarem a geração de código, optam por passar todos os parâmetros na *stack*.

Os registos **$t0-$t9** (**$8-$15**, **$24**, **$25**) são usados para armazenar informação temporária que não precise de ser preservada entre chamadas a subrotinas; estes registos, cujo conteúdo pode ser livremente alterado pelas subrotinas, são designados por registos "*caller-saved*", i.e., cabe ao programa em execução preservar os seus conteúdos no caso de necessitar do seu valor após uma chamada a uma subrotina.

Os registos **$s0-$s7** (**$16-$23**) são usados para armazenar valores com um tempo de vida longo que precisam de ser preservados entre chamadas a subrotinas; são designados por registos "*callee-saved*", i.e., cabe à subrotina em execução preservar os seus valores no caso que necessitar de recorrer à sua utilização temporária.

O registo **$sp** (**$29**), ou *stack-pointer*, aponta para a última posição ocupada na *stack*. Embora o MIPS não tenha instruções próprias para a manipulação de *stacks*, convenciona-se que aquela cresce no sentido decrescente dos endereços e que o conteúdo de **$sp** é um ponteiro para a última posição ocupada da mesma.

O registo **$fp** (**$30**), ou *frame-pointer*, é usado por alguns compiladores para acesso à informação na *stack*.

O registo **$gp** (**$28**) é um apontador global (*global pointer*) que aponta para o meio de um bloco de memória de 64 Kbytes definido na memória *heap* e usado para definir constantes e variáveis globais.

O registo **$ra** (**$31**), finalmente, é usado pela instrução **jal** para armazenar o endereço de retorno das subrotinas.

Sintaxe da Linguagem Assembly

Um programa em linguagem A*ssembly* é um texto a 4 colunas, em que a primeira representa de uma forma simbólica endereços de memória (*labels*), a segunda instruções, a terceira operandos das instruções e a última comentários. Não existe nenhuma imposição quanto ao posicionamento das colunas no texto a não ser obviamente que a sua ordem deve ser respeitada, embora isso seja feito frequentemente para melhorar a legibilidade do texto. Não é possível ter mais do que uma instrução por linha.

Exemplo:

```
            .data
Var_1:      .word 1
            .text
            .globl main
main:       li        $v0, 4       #Comentário
            lw        $a0, Var_1
      …
```

Os endereços são representados por identificadores -- etiquetas (*labels*) -- e devem ser terminados pelo carácter ":". É considerado como comentário tudo o que estiver entre o carácter "#" e o fim da linha, sendo consequentemente ignorado pelo assemblador.

Os identificadores são sequências de caracteres alfanuméricos, barras horizontais, "**_**", e pontos, ".", que não comecem por um carácter numérico. As mnemónicas (*opcodes*) das instruções são palavras reservadas, **não** podendo consequentemente ser usadas como identificadores. Um programa *assembly* pode estar distribuído por mais que um ficheiro; os identificadores podem ser locais, sendo assim apenas válidos no contexto desse ficheiro, ou globais, sendo assim válidos em todos os ficheiros que constituem o programa.

As *strings* são sequências de caracteres delimitadas por aspas (“). A utilização de caracteres especiais segue a convenção da linguagem de programação C. Os caracteres válidos são:

“\t” => tab; “\n” => new line; “\”” => quote

O campo instrução corresponde a uma instrução (nativa ou virtual) do MIPS ou a uma directiva. As directivas são mecanismos que permitem controlar a forma como a assemblagem (processo de geração de código máquina) é levada a cabo, não resultando assim em código executável. São constituídas por um identificador (cujo primeiro carácter é sempre o símbolo “.”) e em alguns casos por um ou mais parâmetros. O MARS suporta o seguinte subconjunto das directivas definidas para o assemblador de MIPS:

- Para controlo dos segmentos:

.data <address>
Os valores definidos nas linhas subsequentes devem ser colocados no segmento de dados do utilizador, opcionalmente a partir do endereço <address>.

.text <address>
Os valores definidos nas linhas subsequentes devem ser colocados no segmento de texto do utilizador, opcionalmente a partir do endereço <address>. Todos os valores devem medir 32 bits, ou seja, serem instruções ou palavras (words).

.kdata <address>
Os valores definidos nas linhas subsequentes devem ser colocados no segmento de dados do kernel, opcionalmente a partir do endereço <address>.

.ktext <address>
Os valores definidos nas linhas subsequentes devem ser colocados no segmento de texto do kernel, opcionalmente a partir do endereço <address>.

- Para criação de constantes e variáveis em memória:

.ascii str
armazena uma *string* em memória sem lhe acrescentar o terminador NUL.

.asciiz str
armazena uma *string* em memória acrescentando-lhe o terminador NUL.

.byte b_1, ..., b_n
armazena as grandezas de 8 bits $\mathbf{b_1, ..., b_n}$ em sucessivos bytes de memória.

.half h_1, ..., h_n
armazena as grandezas de 16 bits $\mathbf{h_1, ..., h_n}$ em sucessivas meias-palavras de memória.

.word w_1, ..., w_n
armazena as grandezas de 32 bits $\mathbf{w_1, ..., w_n}$ em sucessivas palavras de memória.

.float f_1, ..., f_n
armazena os números em vírgula flutuante com precisão simples (32 bits) $\mathbf{f_1, ..., f_n}$ em posições de memória sucessivas.

.double d_1, ..., d_n
armazena os números em vírgula flutuante com precisão dupla (64 bits) $\mathbf{d_1, ..., d_n}$ em posições de memória sucessivas.

.space n
reserva **n** bytes (o MARS só deixa usar esta directiva no segmento **.data**).

Para controlo do alinhamento:

.align n

alinha o próximo item num endereço múltiplo de 2^n . Por exemplo **.align 2** seguido de **.word xpto** garante que a palavra **xpto** é armazenada num endereço múltiplo de 4.

`.align 0`
desliga o alinhamento automático das directivas **.half**, **.word**, **.float**, e **.double** até à próxima directiva **.data** ou **.kdata**.

Para referências externas:

`.globl sym`
declara que o símbolo **sym** é global e pode ser referenciado a partir de outros ficheiros.

`.extern sym size`
declara que o item associado a **sym** ocupa **size** bytes e é um símbolo global. Esta directiva permite ao assemblador armazenar o item numa porção do segmento de dados que seja eficientemente acedido através do registo $gp.

Modos de Endereçamento da memória externa

Os processadores MIPS seguem uma arquitectura do tipo "*load/store*", o que significa que apenas as instruções de *load* e de *store* podem aceder à memória. As instruções de cálculo operam apenas sobre o conteúdo de registos. Além disso o MIPS possui apenas um modo de endereçamento da memória, representado por **`imm(reg)`**, em que o endereço de memória é determinado pela soma do conteúdo do registo **`reg`** (qualquer dos registos gerais do *CPU*) com a constante **`imm`** (limitada a uma quantidade de 16 bits em complemento para dois).

Chamadas ao Sistema (*System Calls*)

O MARS disponibiliza um conjunto de funções típicas de um sistema operativo (ver Tabela II). A sua utilização é feita através da instrução de chamada ao sistema ***syscall***. Para invocar uma determinada função o programa deve carregar o código respectivo no registo **`$v0`** e os argumentos nos registos **`$a0`** a **`$a1`** (ou **`$f12`** para valores em vírgula flutuante). O valor de retorno (caso exista), é devolvido no registo **`$v0`** (ou **`$f0`** no caso de ser em vírgula flutuante).

Exemplo de utilização da *System Call* "print_string":

```
          .data
str:      .asciiz "Uma string!"
          .text
          .globl main
main:     li        $v0, 4
          la        $a0, str
          syscall             # print_string ("Uma string");
          …
```

As funções "*print*" imprimem um valor (**int** – inteiro, **float** – real com precisão simples, **double** – real com precisão dupla, **string** – sequência de caracteres terminada por um NUL e **char** – carácter) na janela *Console*. As funções "*print_bin*" e "*print_hex*" imprimem um valor numérico, respectivamente, em binário e hexadecimal.

As funções "*read*" lêem valores a partir do teclado. O valor lido deve ser terminado pela tecla "*Enter*". Nas funções de leitura de valores numéricos, são ignorados todos os caracteres lidos a partir (e incluindo) o

primeiro carácter não numérico. A função "*read_string*" lê **n-1** caracteres para o *buffer* de entrada e termina a *string* com um carácter NUL. A função termina quando o número de caracteres lido for igual a **n-1** ou quando receber um *new line* (tecla "*Enter*").

A função "*sbrk"* devolve um ponteiro para um bloco de memória contendo *n* bytes adicionais.

A função "*exit"* termina a execução de um programa.

Protótipo equivalente em C	$v0	Parâmetros de entrada	Retorno
`void print_int(int value)`	1	`$a0 = value`	
`void print_float(float value)`	2	`$f12 = value`	
`void print_double(double value)`	3	`$f12 = value`	
`void print_string(char *str)`	4	`$a0 = str`	
`int read_int(void)`	5		`$v0`
`float read_float(void)`	6		`$f0`
`double read_double(void)`	7		`$f0`
`void read_string(char *buf, int length)`	8	`$a0 = buf, $a1 = length`	
`void *Sbrk(int amount)`	9	`$a0 = amount`	`$v0`
`void Exit(void)`	10		
`void print_char(int character)`	11	`$a0 = character`	
`char read_char(void)`	12		`$v0`
`void print_hex(int value)`	34	`$a0 = value`	
`void print_bin(int value)`	35	`$a0 = value`	

Tabela II - *System calls* do MARS

Passagem dos parâmetros da linha de comando

O MARS permite que o programa Assembly recupere da *stack* os parâmetros que lhe sejam passados a partir da linha de comando. Para isso, os primeiros 32 bytes do segmento de texto são automaticamente preenchidos pelo MARS com uma porção de código que inicializa os ponteiros para os locais próprios. O valor de **argc**, variável que em linguagem C contém o número de parâmetros da linha de comando, é passado ao programa através do registo **$a0**. Por sua vez, **$a1** contém o valor de **argv**, variável que contém um ponteiro para uma lista de ponteiros. Cada um dos ponteiros dessa lista (num total de argc ponteiros) aponta para uma string que contém o conteúdo de um dos parâmetros. Finalmente, **$a2** contém o ponteiro para a lista de variáveis do *environment*. Note que, ao contrário do que acontece em C, a lista de parâmetros não inclui o nome do programa. Consequentemente, **argv[0]** aponta directamente para o primeiro parâmetro da lista.

Coprocessador de Vírgula Flutuante (CP1)

O MIPS possui um coprocessador de vírgula flutuante (o coprocessador CP1) que manipula números reais representados em vírgula flutuante com precisão simples (32 bits) e precisão dupla (64 bits) de acordo com a norma IEEE-754. Os operandos para as operações de cálculo disponibilizadas pelo coprocessador pertencem a um conjunto específico de registos designados por **$f0-$f31**. Estes registos desempenham um papel duplo.

Por um lado podem ser vistos como um conjunto de 32 registos independentes com capacidade para armazenar quantidades em vírgula flutuante de precisão simples.

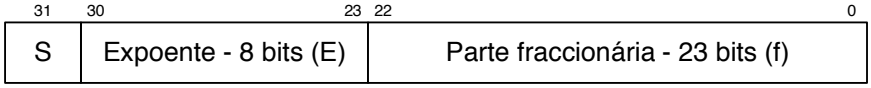
Por outro lado, cada registo par pode ser agrupado ao seguinte (ímpar) para formar um registo com capacidade para armazenar quantidades em vírgula flutuante com precisão dupla. De forma a simplificar a sua utilização, as operações de cálculo, sejam de precisão simples ou dupla, usam apenas os registos de índice par.

Este coprocessador possui ainda dois registos de controlo de 32 bits que são usados para controlo do modo de arredondamento, tratamento de excepções, e para salvaguarda do estado. Uma *flag* interna ao coprocessador, à frente designada por `fp_flag` ou `c1_flag`, serve de suporte às instruções de comparação e salto condicional relativas a entidades em vírgula flutuante.

Apenas a título de resumo, a norma IEEE 754 estabelece as seguintes características para os formatos de representação numérica em vírgula flutuante:

Precisão simples

Os números reais representados em vírgula flutuante com precisão simples são representados por palavras de 32 bits organizados de acordo com a figura seguinte.



O valor do número em vírgula flutuante é dado pela expressão:

$$F = (-1)^S 1.f\, 2^{E-127}$$

sendo ***S*** é o valor do sinal representado pelo bit $\mathbf{b_{31}}$ (‘**0**’ representa um número positivo; ‘**1**’ representa um número negativo), ***f*** (bits $\mathbf{b_{22}}$…$\mathbf{b_0}$) o valor binário da parte fraccionária da quantidade representada, no qual se pressupõe a existência de um *hidden* bit de valor 1 à esquerda da vírgula (representação normalizada), e ***E*** (bits $\mathbf{b_{30}}$…$\mathbf{b_{23}}$) o valor do expoente codificado em excesso de 127. Existem um conjunto de valores particulares que representam excepções à regra e que se encontram sumariados na Tabela III.

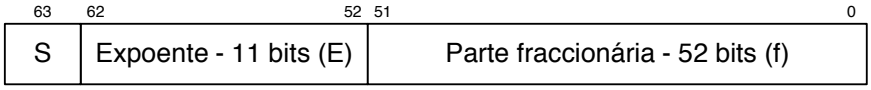
E	***f***	**Significado**
0	0	Representa o valor numérico 0 (zero)
0	≠0	Representação desnormalizada de acordo com a equação $F = (-1)^S 0.f\, 2^{-126}$
255	0	Representa ±∞
255	≠0	Representa NAN (Not A Number)

Tabela III - Excepções no formato IEEE-754

Refira-se em particular que, na representação não normalizada, o *hidden* bit não existe e o expoente é fixo e igual a -126. Esta representação permite diminuir o intervalo entre a menor representação possível e zero, minimizando, consequentemente, o potencial de *underflow*.

Precisão dupla

Os números reais representados em vírgula flutuante com precisão dupla são representados por palavras de 64 bits organizados de acordo com a figura seguinte.



O valor do número em vírgula flutuante é dado pela expressão:

$$F = (-1)^S 1.f\, 2^{E-1023}$$

sendo ***S*** o valor do sinal representado pelo bit $\mathbf{b_{63}}$ (‘**0**’ representa um número positivo; ‘**1**’ representa um número negativo), ***f*** (bits $\mathbf{b_{51}}$…$\mathbf{b_0}$) o valor binário da mantissa no qual se pressupõe a existência de um *hidden* bit de valor 1 à esquerda da vírgula, e ***E*** (bits $\mathbf{b_{62}}$…$\mathbf{b_{52}}$) o valor do expoente codificado em excesso de 1023.

A Tabela IV apresenta um resumo das principais características destes formatos em precisão simples e dupla respectivamente.

	Precisão simples	**Precisão dupla**
Comprimento de palavra	32 bits	64 bits
Mantissa (*Hidden* bit + parte fraccionária)	1 + 23 bits	1 + 52 bits
Expoente	8 bits	11 bits
Offset do expoente	127	1023
Gama de representação aproximada	$2^{128} \approx 3.8\text{x}10^{38}$	$2^{1024} \approx 9\text{x}10^{307}$
Menor número normalizado	$2^{-126} \approx 10^{-38}$	$2^{-1022} \approx 10^{-308}$
Precisão aproximada	$2^{-23} \approx 10^{-7}$	$2^{-52} \approx 10^{-15}$

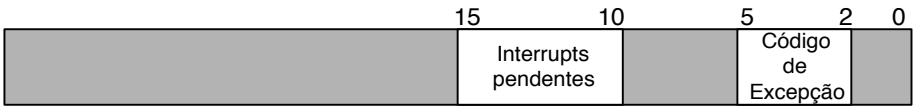
Tabela IV - Mapa comparativo do formato IEEE 754 em precisão simples e dupla

Registos do Coprocessador CP0

O coprocessador CP0 contém registos necessários para a gestão das excepções, do sistema de memória virtual e das *caches* de dados e instruções. Contém ainda um registo com a indicação da versão do processador. O MARS simula apenas 4 destes registos:

`BadVAddr` contém o endereço de memória onde ocorreu a excepção de memória

`Cause` indica o tipo de excepção ocorrida. Apenas os bits 2 a 5 e 10 a 15 têm significado, conforme se pode observar na figura seguinte.



Os cinco bits que identificam os *interrupts* pendentes ($\mathbf{b_{15}..b_{10}}$) correspondem aos cinco níveis de interrupção possíveis. Um bit com o valor lógico ‘1’ neste campo indica a ocorrência de um *interrupt* a esse nível que ainda não foi servido. O código de excepção, correspondente aos bits $\mathbf{b_5..b_2}$, contém um código de identificação de interrupção de acordo com a Tabela V.

Número	Nome	Descrição
0	INT	*Interrupt* externo
4	ADDRL	Erro de endereço (em instrução de *load* ou na operação de *fetch*)
5	ADDRS	Erro de endereço (em instruções de *store*)
6	IBUS	Erro de *Bus* em operação de *fetch* de instrução
7	DBUS	Erro de *Bus* em operação de *Load* ou *Store* de dados
8	SYSCALL	Excepção de chamada ao sistema
9	BKPT	*Break Point*
10	RI	Excepção de instrução reservada
12	OVF	Excepção provocada por *overflow* aritmético

Tabela V - Códigos de excepção

`Status` contém um conjunto de bits de *status* e controlo dos quais são implementados pelo MARS os indicados na figura seguinte.

A máscara de *interrupts* ($\mathbf{b_{15}..b_{10}}$) contém um bit para cada um dos cinco níveis de interrupção. Quando um desses bits toma o valor lógico '**1**', o nível de interrupção correspondente encontra-se activo. Os seis bits menos significativos deste registo implementam uma *stack* de três níveis para os bits de identificação do *kernel*/*user* e *interrupt enable*. Um valor lógico '**0**' no bit *kernel*/*user* indica que o programa estava a correr parte do *kernel* no momento em que ocorreu a interrupção. Um valor lógico '**1**' indica que a execução pertencia ao utilizador.

`EPC` guarda o endereço da instrução que causou a excepção.

Input e Output

Para além de simular as operações básicas do *CPU* do MIPS e do respectivo sistema operativo, o MARS também simula operações de entrada/saída (*Input*/*Output* ou *I*/*O*) relativamente a uma ligação a um terminal virtual mapeado em memória. Quando um programa Assembly se encontra em execução, o simulador "liga" o seu próprio terminal virtual ao processador simulado. O programa pode assim ler caracteres directamente do teclado à medida que estes vão sendo digitados pelo operador. Da mesma forma, é possível executar instruções para escrever caracteres directamente no écran da consola virtual. A única excepção a esta regra diz respeito à associação de teclas [Control+C]. O resultado não é passado para o programa mas, alternativamente, este é colocado em modo "*break*" devolvendo o comando ao MARS e actualizando o conteúdo das várias janelas. Para poder usar este modo especial de I/O, é necessário que o campo "*Mapped I/O*" da janela de diálogo iniciada pelo comando "*Simulator | Settings*" esteja activado.

O dispositivo terminal correspondente à consola virtual consiste em duas unidades independentes: um receptor e um emissor. O receptor lê caracteres a partir do teclado à medida que estes vão sendo digitados. O emissor, por sua vez, escreve caracteres no ecrã da consola virtual. As duas unidades são completamente

independentes. Isso significa, por exemplo, que não é executado o eco automático dos caracteres digitados no teclado. Pelo contrário, o processador deve ler um carácter de entrada a partir do receptor e retransmiti-lo para o emissor para obter o seu eco visual.

O programa acede ao terminal virtual usando quatro registos especiais mapeados em memória (Figura 3). Mapeados em memória significa que cada um destes registos surge associado a um endereço de memória especial e dedicado a esse fim. O "Registo de Controlo de Recepção" localiza-se no endereço **`0xffff0000`**. Apenas dois dos seus 32 bits são usados de facto. O bit $\mathbf{b_0}$, designado por "*Ready*", indica, quando o seu valor é '**1**', que um novo carácter foi recebido a partir do teclado, e que este ainda não foi lido do "Registo de Dados do Receptor". Este bit é alterado apenas pelo simulador, não podendo consequentemente, ser alterado pelo programa; muda automaticamente de '**0**' para '**1**' quando um carácter é recebido do teclado, e regressa automaticamente a '**0**' quando o carácter correspondente é lido do "Registo de Dados do Receptor".

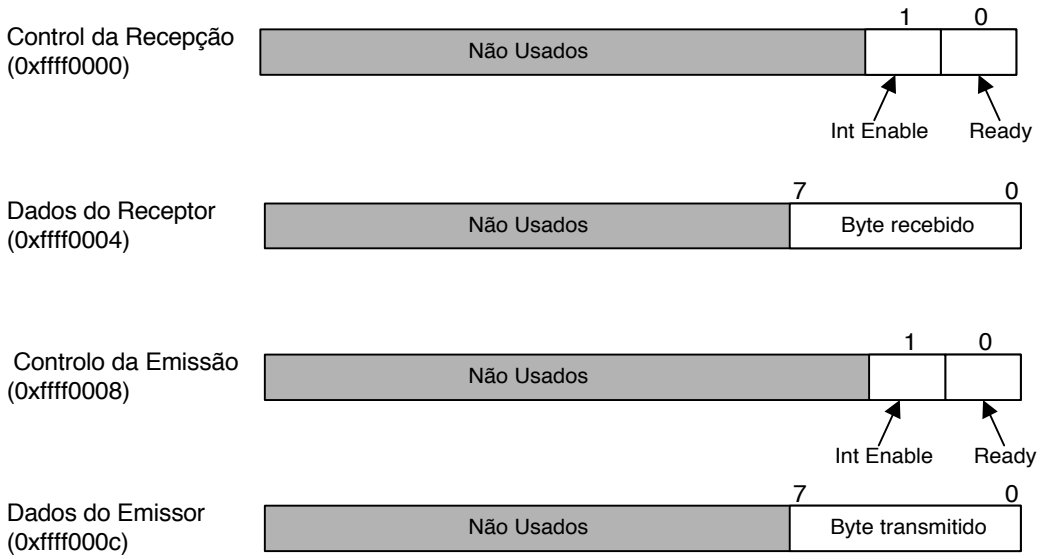


Figura 3 - Os registos para acesso *I/O* ao terminal virtual

O bit $\mathbf{b_1}$ do "Registo de Controlo de Recepção" é o "*Interrupt Enable*". Este bit pode ser lido ou escrito pelo programa. Inicialmente, o seu valor é colocado a '**0**'. Se o programa o forçar a '**1**', é gerada uma interrupção de nível zero sempre que o "*Ready*" bit passar de '**0**' para '**1**'. Para que esta interrupção possa ser recebida pelo processador, os *interrupts* devem estar activos através do registo de **Status** do coprocessador C0.

O segundo registo do dispositivo terminal é o "Registo de Dados do Receptor", o qual existe no endereço **`0xffff0004`**. Os oito bits menos significativos deste registo contêm o último carácter digitado no teclado. Todos os restantes 24 bits têm o valor '**0**'. Este registo é do tipo "*read-only*". Qualquer tentativa para escrever no mesmo é ignorada pelo simulador. Ler o conteúdo deste registo provoca o "*reset*" do bit "*Ready*" do registo anterior.

O terceiro registo do dispositivo terminal é o "Registo de Controlo de Emissão" localizado no endereço **`0xffff0008`**. Apenas os dois bits menos significativos têm significado, e este comportam-se de forma muito semelhante aos bits do "Registo de Controlo de Recepção". O bit $\mathbf{b_0}$, quando '**1**', indica que o emissor

está pronto o receber mais um carácter. Se o seu valor for '**0**', então o emissor encontra-se ainda ocupado a transmitir o carácter anterior. O bit $\mathbf{b_1}$, por sua vez, é o "*Interrupt Enable*". Um '**1**' neste bit desencadeia uma interrupção de nível um sempre que o "*Ready*" bit passar de '**0**' para '**1**'

O último registo do dispositivo terminal é o "Registo de Dados do Emissor", o qual existe no endereço **`0xffff000c`**. Quando escrito pelo programa, os seus oito bits menos significativos são interpretados como sendo um carácter ASCII, o qual é enviado e afixado no écran da consola. O registo deverá ser escrito apenas quando o bit "*Ready*" do "Registo de Controlo de Emissão" se encontrar no seu estado activo ('**1**'). Qualquer operação de escrita efectuada sem ser nessas condições não terá qualquer efeito prático, embora o programa em execução não tenha conhecimento do facto.

Reportório de Instruções

O conjunto de instruções disponibilizadas pelo simulador está enriquecido em relação ao conjunto de instruções da máquina real, não apenas pela existência do maior número de modos de endereçamento mas também pela existência de novas instruções. Muitas destas novas instruções desdobram-se na máquina real em duas ou mais instruções; no entanto, algumas há que representam apenas sintaxes mais apropriadas para operações que na máquina real podem ser realizadas por uma única instrução. Considere-se, a título de exemplo, a instrução virtual **`move $s0,$s1`**, e as instruções nativas **`add $s0,$s1,$0`** ou **`or $s0,$s1,$0`**: embora as três instruções façam rigorosamente o mesmo a instrução virtual é a que retrata de uma forma mais adequada uma operação do tipo "**`a`** toma o valor de **`b`**". O uso de instruções virtuais pode, por isso, contribuir para tornar o programa *assembly* mais curto e mais legível.

No texto que se segue faz-se uma apresentação pormenorizada do reportório de instruções dividido por categorias funcionais. As instruções apresentadas podem ser completamente nativas, completamente virtuais ou possuírem um código de operação (*opcode*) nativo mas modos de endereçamento enriquecidos. Por forma a distinguir facilmente as instruções pertencentes a cada caso optou-se por escrever as pertencentes ao primeiro em letra normal, as pertencentes ao segundo em **negrito** (*bold*) e as pertencentes ao último em letra normal com as partes não nativas em **negrito**. Em todas as instruções que caem nesta última categoria apenas um dos operandos é virtual e apresenta uma das formas seguintes:

Imm representa um valor constante com 16 ou 32 bits; o primeiro caso corresponde à instrução nativa

Src representa um registo do *CPU* ou uma constante (imediato); o primeiro caso corresponde à instrução nativa

Imm(Reg) **Reg** é um dos registos internos do CPU e **Imm** é uma quantidade de 16 bits em complemento para dois.

Instruções de Transferência Memória-Registo (*Load)*

Incluem-se nesta categoria instruções que realizam uma operação algorítmica do tipo "`var = value`" (`var` toma o valor de `value`), em que `var` representa um registo e `value` um valor armazenado em memória (na descrição da instrução, *addr* representa o conteúdo do registo *Reg* adicionado à Constante *Imm*).

la Rdst,address	Load Address	Rdst = address

Calcula o endereço addr e coloca o resultado no registo geral Rdst.

lb Rdst,Imm(Reg)	Load Byte	Rdst = *(byte)addr

Lê da memória o byte cujo endereço é addr, extende-o, com sinal, para 32 bits e coloca o resultado no registo Rdst.

lbu Rdst,Imm(Reg)	Load Byte Unsigned	Rdst = *(unsigned byte)addr

Lê da memória o byte cujo endereço é addr, extende-o, com zeros, para 32 bits e coloca o resultado no registo Rdst.

lw Rdst,Imm(Reg)	Load Word	Rdst = *(word)addr

Lê da memória a palavra cujo endereço é addr e coloca-a no registo Rdst.

As instruções seguintes permitem transferir informação da memória para registos dos coprocessadores.

lwc*z*[3] CReg,Imm(Reg)	Load Word Coprocessor z	CReg = *(word)addr

Carrega o registo CReg do coprocessador Cz com o valor de 32 bits armazenado no endereço addr.

l.d FPReg,Imm(Reg)	Load Double	FPReg = *(double)addr

Carrega o registo FPReg do coprocessador de vírgula flutuante com o valor real duplo armazenado no endereço addr.

l.s FPReg,Imm(Reg)	Load Single	FPReg = *(single)addr

Carrega o registo FPReg do coprocessador de vírgula flutuante com o valor real simples armazenado no endereço addr.[4]

Instruções de Transferência Registo-Memória (*Store)*

Incluem-se nesta categoria instruções que realizam uma operação algorítmica do tipo "**var = value**" (**var** toma o valor de **value**), em que **var** representa uma variável em memória e **value** um valor armazenado em registo (na descrição da instrução, *addr* representa o conteúdo do registo *Reg* adicionado à Constante *Imm*).

sb Rdst,Imm(Reg)	Store Byte	*addr = (byte)Rdst

Armazena no endereço addr o byte menos significativo do registo Rdst.

sw Rdst,Imm(Reg)	Store Word	*addr = (word)Rdst

Armazena no endereço addr a palavra do registo Rdst.

As instruções seguintes permitem transferir informação dos registos dos coprocessadores para memória.

swc*z* CReg,Imm(Reg)	Store Word Coprocessor z	*(word)addr = CReg

Armazena no endereço addr o valor de 32 bits contido no registo CReg do coprocessador Cz.

s.d FPReg,Imm(Reg)	Store Double	*(double)addr = FPReg

Armazena no endereço `addr` o número real duplo do registo `FPReg` de coprocessador de vírgula flutuante.

s.s FPReg,Imm(Reg)	Store Single	*(single)addr = FPReg

Armazena no endereço `addr` o número real simples do registo `FPReg` do coprocessador de vírgula flutuante.[5]

---

[3] *z* deverá ser substituído pelo número do coprocessador pretendido.

[4] Esta instrução é equivalente à instrução `lwc1 FPReg,Imm(Reg)`.

Instruções de Transferência Registo-Registo (*Move*)

Incluem-se nesta categoria instruções que realizam uma operação algorítmica do tipo "**`var = value`**" (**`var`** toma o valor de **`value`**), em que **`var`** e **`value`** são registos.

`move Rdst,Rsrc`	Move	Rdst = Rsrc

Copia o valor do registo Rsrc para o registo Rdst.

O resultado das operações de multiplicação e divisão inteiras é colocado nos registos **HI** e **LO**, ambos de 32 bits. As instruções seguintes permitem transferir informação entre aqueles registos e os registos gerais.

`mfhi Rdst`	Move From HI	Rdst = HI

Copia o valor do registo HI para o registo Rdst.

`mflo Rdst`	Move From LO	Rdst = LO

Copia o valor do registo LO para o registo Rdst.

`mthi Rsrc`	Move To HI	HI = Rsrc

Copia o valor do registo Rsrc para o registo HI.

`mtlo Rsrc`	Move To LO	LO = Rsrc

Copia o valor do registo Rsrc para o registo LO.

As instruções seguintes permitem transferir informação entre os registos dos coprocessadores e os registos gerais do CPU.

`mfcz Rdst,CReg`	Move From Coprocessor Cz	Rdst = CReg

Copia o valor do registo `CReg` do coprocessador Cz para o registo geral `Rdst`.

`mtcz Rsrc,CReg`	Move To Coprocessor Cz	CReg = Rsrc

Copia o valor do registo geral `Rsrc` para o registo `CReg` do coprocessador Cz.

Copia o valor real duplo (64 bits) do registo `FPReg` do coprocessador de vírgula flutuante para os registos gerais `Rdst` e `Rdst`+1.

As instruções seguintes permitem transferir valores entre registos do coprocessador de vírgula flutuante.

`mov.d $fd,$fs`	Move Double	$fd = $fs

Copia o valor real duplo do registo $fs para o registo $fd.

`mov.s $fd,$fs`	Move Single	$fd = $fs

Copia o valor real simples do registo $fs para o registo $fd.

[5] Esta instrução é equivalente à instrução `swc1 FPReg,Imm(Reg)`.

Instruções de Manipulação de Constantes (*Load Immediate*)

Incluem-se nesta categoria instruções que realizam uma operação algorítmica do tipo "**`var = value`**" (**`var`** toma o valor de **`value`**), em que **`var`** representa um registo e **`value`** uma constante (imediato).

`li Rdst,Imm`	Load Immediate	Rdst = Imm

Copia a constante Imm para o registo Rdst.

`lui Rdst,Imm`	Load Upper Immediate	Rdst = Imm << 16

Copia a constante Imm (16 bits) para os 16 bits mais significativos do registo Rdst, colocando os menos significativos a zero.

~~**`li.d $fd,double`**~~	~~Load Immediate Double~~	~~$fd = double~~

Copia a constante real double para os registos do coprocessador de vírgula flutuante $fd e $fd+1.

~~**`li.s $fd,float`**~~	~~Load Immediate Single~~	~~$fd = float~~

Copia a constante real float para o registo do coprocessador de vírgula flutuante $fd.

Instruções de Cálculo sobre Inteiros: Operações Aritméticas

Incluem-se nesta categoria instruções que realizam operações aritméticas sobre quantidades inteiras.

Calcula o valor absoluto do valor do registo Rsrc e coloca o resultado no registo Rdst.

`add Rdst,Rsrc,`**`Src`**	Addition	Rdst = Rsrc + Src

Calcula a soma do registo Rsrc e da quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst. Gera uma excepção em caso de *overflow*.

`addi Rdst,Rsrc,`**`Imm`**	Addition Immediate	Rdst = Rsrc + Imm

Calcula a soma do registo Rsrc e da constante Imm e coloca o resultado no registo Rdst. Gera uma excepção em caso de *overflow*.

`addiu Rdst,Rsrc,`**`Imm`**	Addition Immediate Unsigned	Rdst = Rsrc + Imm

Calcula a soma do registo Rsrc e da constante Imm e coloca o resultado no registo Rdst. Ignora *overflow*.

`addu Rdst,Rsrc,`**`Src`**	Addition Unsigned	Rdst = Rsrc + Src

Calcula a soma do registo Rsrc e da quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst. Ignora *overflow*.

`div Rsrc,Rsrc2`	Division	HI = Rsrc % Rsrc2 LO = Rsrc / Rsrc2

Calcula a divisão inteira do registo Rsrc pelo registo Rsrc2. O resultado, resto e quociente, é colocado nos registos HI e LO. Gera uma excepção em caso de *overflow*.

`divu Rsrc,Rsrc2`	Division Unsigned	HI = Rsrc % Rsrc2 LO = Rsrc / Rsrc2

Calcula a divisão inteira do registo Rsrc pelo registo Rsrc2. O resultado, resto e quociente, é colocado nos registos HI e LO. Ignora *overflow*.

`div Rdst,Rsrc,Src`	Division	Rdst = Rsrc / Src

Calcula o quociente da divisão inteira entre o registo Rsrc e a quantidade (registo ou constante) Src e coloca-o no registo Rdst. Gera uma excepção em caso de *overflow*.

`divu Rdst,Rsrc,Src`	Division Unsigned	Rdst = Rsrc / Src

Calcula o quociente da divisão inteira entre o registo Rsrc e a quantidade (registo ou constante) Src e coloca-o no registo Rdst. Ignora *overflow*.

`mul Rdst,Rsrc,Src`	Multiply	Rdst = Rsrc * Src

Calcula o produto do registo Rsrc pela quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst. Ignora *overflow*.

mulo Rdst,Rsrc,Src	Multiply	Rdst = Rsrc * Src

Calcula o produto do registo Rsrc pela quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst. Gera uma excepção em caso de *overflow*.

mulou Rdst,Rsrc,Src	Multiply Unsigned	Rdst = Rsrc * Src

Calcula o produto do registo Rsrc pela quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst. Gera uma excepção em caso de *overflow*.

mult Rsrc1,Rsrc2	Multiply	HI,LO = Rsrc1 * Rsrc2

Calcula o produto dos registos Rsrc1 e Rsrc2 e coloca o resultado nos registos HI e LO.

multu Rsrc1,Rsrc2	Multiply Unsigned	HI,LO = Rsrc1 * Rsrc2

Calcula o produto dos registos Rsrc1 e Rsrc2 e coloca o resultado nos registos HI e LO. Interpreta os operandos como valores sem sinal..

neg Rdst,Rsrc	Negate	Rdst = - Rsrc

Calcula a negação (complemento para 2) do registo Rsrc e coloca o resultado no registo Rdst. Gera uma excepção em caso de *overflow*.

negu Rdst,Rsrc	Negate	Rdst = 0 - Rsrc

Calcula a negação (complemento para 2) do registo Rsrc e coloca o resultado no registo Rdst. Ignora *overflow*.

rem Rdst,Rsrc,Src	Remainder	Rdst = Rsrc % Src

Calcula o resto da divisão inteira entre o registo Rsrc e a quantidade (registo ou constante) Src e coloca o resultado no registo Rdst.

remu Rdst,Rsrc,Src	Remainder Unsigned	Rdst = Rsrc % Src

Calcula o resto da divisão inteira entre o registo Rsrc e a quantidade (registo ou constante) Src e coloca o resultado no registo Rdst. Interpreta os operandos como valores sem sinal.

sub Rdst,Rsrc,**Src**	Subtract	Rdst = Rsrc - Src

Calcula a subtração do registo Rsrc pela quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst. Gera uma excepção em caso de *overflow*.

subu Rdst,Rsrc,**Src**	Subtract Unsigned	Rdst = Rsrc - Src

Calcula a subtração do registo Rsrc pela quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst. Ignora *overflow*.

Instruções de Cálculo sobre Inteiros: Operações Lógicas Bit-a-Bit (*Bitwise*)

Incluem-se nesta categoria instruções que realizam operações lógicas bit-a-bit (*bitwise*) sobre quantidades inteiras.

and Rdst,Rsrc,**Src**	And (Bitwise)	Rdst = Rsrc & Src

Calcula o produto lógico bit-a-bit (*bitwise and*) do registo Rsrc e da quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst.

andi Rdst,Rsrc,**Imm**	And Immediate (Bitwise)	Rdst = Rsrc & Imm

Calcula o produto lógico bit-a-bit (*bitwise and*) do registo Rsrc e da constante Imm e coloca o resultado no registo Rdst.

nor Rdst,Rsrc,**Src**	Nor (Bitwise)	Rdst = Rsrc !| Src

Calcula o não-ou bit-a-bit (*bitwise nor*) do registo Rsrc e da quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst.

not Rdst,Rsrc	Not (Bitwise)	

Calcula a negação bit-a-bit (*bitwise not*) do registo Rsrc e coloca o resultado no registo Rdst.

or Rdst,Rsrc,**Src**	Or (Bitwise)	Rdst = Rsrc | Src

Calcula o ou bit-a-bit (*bitwise or*) do registo Rsrc e da quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst.

ori Rdst,Rsrc,**Imm**	Or Immediate (Bitwise)	Rdst = Rsrc | Imm

Calcula o ou bit-a-bit (*bitwise or*) do registo Rsrc e da constante Imm e coloca o resultado no registo Rdst.

`xor Rdst,Rsrc,Src`	XOR	Rdst = Rsrc ^ Src

Calcula o ou-exclusivo (XOR) entre registo Rsrc e a quantidade Src (registo ou constante) e coloca o resultado no registo Rdst.

`xori Rdst,Rsrc,Imm`	XOR Immediate	Rdst = Rsrc ^ Imm

Calcula o ou-exclusivo (XOR) entre registo Rsrc e a constante Imm e coloca o resultado no registo Rdst.

Instruções de Cálculo sobre Inteiros: Operações de Deslocamento (*Shitf*) e de Rotação (*Rotate*)

Incluem-se nesta categoria instruções que realizam operações de deslocamento (*shift*) e de rotação (*rotate*) sobre quantidades inteiras.

`rol Rdst,Rsrc,Src`	Rotate Left	Rdst = Rsrc <<° Src

Coloca o resultado da rotação para a esquerda do registo Rsrc pela quantidade (registo ou constante) Src no registo Rdst.

`ror Rdst,Rsrc,Src`	Rotate Right	Rdst = Rsrc >>° Src

Coloca o resultado da rotação para a direita do registo Rsrc pela quantidade (registo ou constante) Src no registo Rdst.

`sll Rdst,Rsrc,Src`	Shift Left Logical	Rdst = Rsrc << Src

Desloca (shitf) Src bits para a esquerda o conteúdo do registo Rsrc e coloca o resultado em Rdst.

`sllv Rdst,Rsrc,Rsrc2`	Shift Left Logical Variable	Rdst = Rsrc << Rsrc2

Desloca (shitf) Rsrc2 bits para a esquerda o conteúdo do registo Rsrc e coloca o resultado em Rdst.

`sra Rdst,Rsrc,Src`	Shift Right Arithmetic	Rdst = Rsrc >> Src

Desloca (shitf) Src bits para a direita o conteúdo do registo Rsrc e coloca o resultado em Rdst.

`srav Rdst,Rsrc,Rsrc2`	Shift Right Arithmetic Variable	Rdst = Rsrc >> Rsrc2

Desloca (shitf) Rsrc2 bits para a direita o conteúdo do registo Rsrc e coloca o resultado em Rdst.

`srl Rdst,Rsrc,Src`	Shift Right Logical	Rdst = Rsrc >> Src

Desloca (shitf) Src bits para a direita o conteúdo do registo Rsrc e coloca o resultado em Rdst. Operação sem-sinal (*unsigned*).

`srlv Rdst,Rsrc,Rsrc2`	Shift Right Logical Variable	Rdst = Rsrc >> Rsrc2

Desloca (shitf) Rsrc2 bits para a direita o conteúdo do registo Rsrc e coloca o resultado em Rdst. Operação sem-sinal (*unsigned*).

Instruções de Comparação

Todas as instruções nesta categoria fazem uma comparação (operação relacional) entre duas quantidades e afectam um registo com o resultado (verdadeiro ou falso) da comparação.

`seq Rdst,Rsrc,Src`	Set on Equal	Rdst = (Rsrc == Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é igual a Src e a 0 caso contrário.

`sge Rdst,Rsrc,Src`	Set on Greater Than or Equal	Rdst = (Rsrc >= Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é maior ou igual a Src e a 0 caso contrário.

`sgeu Rdst,Rsrc,Src`	Set on Greater Than or Equal Unsigned	Rdst = (Rsrc >= Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é maior ou igual a Src e a 0 caso contrário. Operação sem-sinal (*unsigned*).

`sgt Rdst,Rsrc,Src`	Set on Greater Than	Rdst = (Rsrc > Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é maior que Src e a 0 caso contrário.

`sgtu Rdst,Rsrc,Src`	Set on Greater Than Unsigned	Rdst = (Rsrc > Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é maior que Src e a 0 caso contrário. Operação sem-sinal (*unsigned*).

sle Rdst,Rsrc,Src	Set on Less Than or Equal	Rdst = (Rsrc <= Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é menor ou igual a Src e a 0 caso contrário.

sleu Rdst,Rsrc,Src	Set on Less Than or Equal Unsigned	Rdst = (Rsrc <= Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é menor ou igual a Src e a 0 caso contrário. Operação sem-sinal (*unsigned*).

slt Rdst,Rsrc,**Src**	Set on Less Than	Rdst = (Rsrc < Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é menor que Src e a 0 caso contrário.

sltu Rdst,Rsrc,**Src**	Set on Less Than Unsigned	Rdst = (Rsrc < Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é menor que Src e a 0 caso contrário. Operação sem-sinal (*unsigned*).

slti Rdst,Rsrc,**Imm**	Set on Less Than Immediate	Rdst = (Rsrc < Imm) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é menor que Imm e a 0 caso contrário.

sltiu Rdst,Rsrc,**Imm**	Set on Less Than Immediate Unsigned	Rdst = (Rsrc < Imm) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é menor que Imm e a 0 caso contrário. Operação sem-sinal (*unsigned*).

sne Rdst,Rsrc,Src	Set on Not Equal	Rdst = (Rsrc != Src) ? 1 : 0

Coloca Rdst a 1 se Rsrc é diferente de Src e a 0 caso contrário.

Instruções de Salto Relativo (*Branch*) e Salto Absoluto (*Jump*)

Nas instruções de salto relativo (*branch*) o salto é definido por uma quantidade com sinal de 16 bits que representa a distância em número de instruções (não de bytes) para onde se pretende saltar; ou seja, o salto está limitado a 2^{15}-1 instruções para a frente ou 2^{15} instruções para trás. No entanto, ao nível da linguagem *assembly* especifica-se o endereço para onde se pretende saltar, deixando ao assemblador o papel de transformar esse valor num deslocamento (*offset*). Nas instruções de salto absoluto (*jump*) é especificado directamente o endereço para onde se pretende saltar, através de um registo ou de uma quantidade de 26 bits que multiplicada por 4 (número de bytes de cada instrução) define o endereço alvo.

b Label	Branch	goto label

Salta para o endereço Label.

bc*z*f Label	Branch Coprocessor z FALSE	if (cz_flag == FALSE) goto label

Salta para o endereço Label se a *flag* de condição do coprocessador z é FALSE.

bc*z*t Label	Branch Coprocessor z TRUE	if (cz_flag == TRUE) goto label

Salta para o endereço Label se a *flag* de condição do coprocessador z é TRUE.

beq Rsrc1,**Src2**,Label	Branch on Equal	if (Rsrc1 == Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o registo Rsrc1 é igual à quantidade Src2 (registo ou constante).

beqz Rsrc,Label	Branch on Equal Zero	if (Rsrc == 0) goto label

Salta para o endereço Label se o registo Rsrc1 é igual a zero.

bge Rsrc1,Src2,Label	Branch on Greater Than or Equal	if (Rsrc1 >= Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o registo Rsrc1 é maior ou igual à quantidade Src2 (registo ou constante).

bgeu Rsrc1,Src2,Label	Branch on Greater Than or Equal Unsigned	if (Rsrc1 >= Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o registo Rsrc1 é maior ou igual à quantidade Src2 (registo ou constante). Operação sem sinal (*unsigned*).

bgez Rsrc,Label	Branch on Greater Than or Equal Zero	if (Rsrc1 >= 0) goto label

Salta para o endereço Label se o registo Rsrc1 é maior ou igual a 0.

`bgezal Rsrc,Label`	Branch on Greater Than or Equal Zero and Link	if (Rsrc1 >= 0) { $31=PC; goto label }

Salta para o endereço Label se o registo Rsrc1 é maior ou igual que 0. Antes de saltar guarda o endereço da próxima instrução no registo $31.

`bgt Rsrc1,Src2,Label`	Branch on Greater Than	if (Rsrc1 > Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é maior que quantidade Src2 (registo ou constante).

`bgtu Rsrc1,Src2,Label`	Branch on Greater Than Unsigned	if (Rsrc1 > Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é maior que quantidade Src2 (registo ou constante). Operação sem sinal (*unsigned*).

`bgtz Rsrc,Label`	Branch on Greater Than Zero	if (Rsrc1 > 0) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é maior que 0.

`ble Rsrc1,Src2,Label`	Branch on Less Than or Equal	if (Rsrc1 <= Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é menor ou igual que quantidade Src2 (registo ou constante).

`bleu Rsrc1,Src2,Label`	Branch on Less Than or Equal Unsigned	if (Rsrc1 <= Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é menor ou igual que a quantidade Src2 (registo ou constante). Operação sem sinal (*unsigned*).

`blez Rsrc,Label`	Branch on Less Than or Equal Zero	if (Rsrc1 <= 0) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é menor ou igual que 0.

`blt Rsrc1,Src2,Label`	Branch on Less Than	if (Rsrc1 < Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é menor que quantidade Src2 (registo ou constante).

`bltu Rsrc1,Src2,Label`	Branch on Less Than Unsigned	if (Rsrc1 < Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é menor que a quantidade Src2 (registo ou constante). Operação sem sinal (*unsigned*).

`bltz Rsrc,Label`	Branch on Less Than Zero	if (Rsrc1 < 0) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é menor que 0.

`bltzal Rsrc,Label`	Branch on Less Than Zero and Link	if (Rsrc1 < 0) { $31=PC; goto label }

Salta para o endereço Label se o registo Rsrc1 é menor que 0. Antes de saltar guarda o endereço da próxima instrução no registo $31.

`bne Rsrc1,Src2,Label`	Branch on Not Equal	if (Rsrc1 != Src2) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é diferente à quantidade Src2 (registo ou constante).

`bnez Rsrc,Label`	Branch on Not Equal Zero	if (Rsrc != 0) goto label

Salta para o endereço Label se o conteúdo do registo Rsrc1 é diferente a zero.

`j Label`	Jump	goto label

Salta para o endereço Label.

`jal Label`	Jump and Link	$31=PC; goto label

Salta para o endereço Label, armazenando o endereço da próxima instrução no registo $31.

`jalr Rsrc`	Jump and Link Register	$31=PC; goto Rsrc

Salta para o endereço dado pelo conteúdo do registo Rsrc, armazenando o endereço da próxima instrução no registo $31.

`jr Rsrc`	Jump Register	goto Rsrc

Salta para o endereço dado pelo conteúdo do registo Rsrc.

Instruções de Cálculo em Vírgula Flutuante

Todas as instruções nesta categoria realizam operações de cálculo sobre quantidades reais representadas em vírgula flutuante (formato IEEE-754). Estas operações estão disponíveis tanto para quantidades em precisão simples como em precisão dupla. As mnemónicas usadas num caso e noutro são praticamente iguais apenas diferindo num sufixo: **`.s`** para as operações em precisão simples, e **`.d`** para precisão dupla. Como forma de simplificar a apresentação das instruções seguintes usa-se um sufixo **`.p`** para representar genericamente os dois tipos de precisão, devendo este ser substituído, aquando da utilização da instrução, pelo sufixo adequado (**`.s`** para precisão simples e **`.d`** para precisão dupla).

`abs.p $fd,$fs`	Absolute Value	$fd = | $fs |

Calcula o valor absoluto do número real (simples ou duplo) no registo $fs e coloca o resultado no registo $fd.

`add.p $fd,$fs,$ft`	Addition	$fd = $fs + $ft

Calcula a soma dos números reais (simples ou duplos) nos registos $fs e $ft e coloca o resultado no registo $fd.

`c.eq.p $fs,$ft`	Compare Equal	fp_flag = ($fs == $ft) ? true : false

Compara os números reais (simples ou duplos) nos registos $fs e $ft e coloca a *flag* de condição a TRUE se forem iguais.

`c.le.p $fs,$ft`	Compare Less Than or Equal	fp_flag = ($fs <= $ft) ? true : false

Compara os números reais (simples ou duplos) nos registos $fs e $ft e coloca a *flag* de condição a TRUE se o primeiro for menor ou igual que o segundo.

`c.lt.p $fs,$ft`	Compare Less Than	fp_flag = ($fs < $ft) ? true : false

Compara os números reais (simples ou duplos) nos registos $fs e $ft e coloca a *flag* de condição a TRUE se o primeiro for menor que o segundo.

`cvt.d.s $fd,$fs`	Convert Single to Double	$fd = (double)$fs

Converte o número real simples no registo $fs para duplo e coloca o resultado no registo $fd.

`cvt.d.w $fd,$fs`	Convert Integer to Double	$fd = (double)$fs

Converte o número inteiro (*word*) no registo $fs para real duplo e coloca o resultado no registo $fd.

`cvt.s.d $fd,$fs`	Convert Double to Single	$fd = (float)$fs

Converte o número real duplo no registo $fs para simples e coloca o resultado no registo $fd.

`cvt.s.w $fd,$fs`	Convert Integer to Single	$fd = (float)$fs

Converte o número inteiro (*word*) no registo $fs para real simples e coloca o resultado no registo $fd.

`cvt.w.d $fd,$fs`	Convert Double to Integer	$fd = (int)$fs

Converte o número real duplo no registo $fs para inteiro (*word*) e coloca o resultado no registo $fd.

`cvt.w.s $fd,$fs`	Convert Single to Integer	$fd = (int)$fs

Converte o número real simples no registo $fs para inteiro (*word*) e coloca o resultado no registo $fd.

`div.p $fd,$fs,$ft`	Divide	$fd = $fs / $ft

Calcula a divisão dos números reais (simples ou duplos) nos registos $fs e $ft e coloca o resultado no registo $fd.

`mul.p $fd,$fs,$ft`	Multiply	$fd = $fs * $ft

Calcula o produto dos números reais (simples ou duplos) nos registos $fs e $ft e coloca o resultado no registo $fd.

`neg.p $fd,$fs`	Negate	$fd = 0 - $fs

Faz a negação do número real (simples ou duplo) no registo $fs e coloca o resultado no registo $fd.

`sub.p $fd,$fs,$ft`	Subtract	$fd = $fs - $ft

Calcula a subtracção dos números reais (simples ou duplos) nos registos $fs e $ft e coloca o resultado no registo $fd.

Instruções para Manipulação de Excepções e *Traps*

`break n`	Break	

Provoca a excepção n. A excepção 1 é reservada para o *debugger*.

`nop`	No Operation	

Não faz nada.

`rfe`	Return From Exception	

Restaura o conteúdo do registo Status.

`syscall`	System Call	

Chamada ao sistema operativo. Ver secção "Chamadas ao Sistema (System Calls)".

Organização da Memória

À semelhança do que tipicamente acontece nos sistemas baseados no processador MIPS o MARS divide a memória em três segmentos: texto, dados e *stack*. O segmento texto (**`.text`**) começa no endereço **`0x400000`** (o código de utilizador é carregado, por omissão, a partir do endereço **`0x400020`**) e é usado para alojar as instruções do programa. O segmento de dados (**`.data`**) começa no endereço **`0x10010000`** e é usado para armazenar os dados do programa. Este segmento está por sua vez subdividido em duas partes. A primeira (a partir do endereço **`0x10010000`**) é usada para alocar objectos cujos comprimento e endereço são conhecidos aquando da assemblagem. Imediatamente a seguir são colocados os objectos alocados dinamicamente usando a chamada ao sistema `sbrk`[6]. Por fim o segmento *stack* (**`.stack`**) começa no topo da memória virtual (**`0x7fffffff`**) e cresce no sentido contrário ao dos endereços.

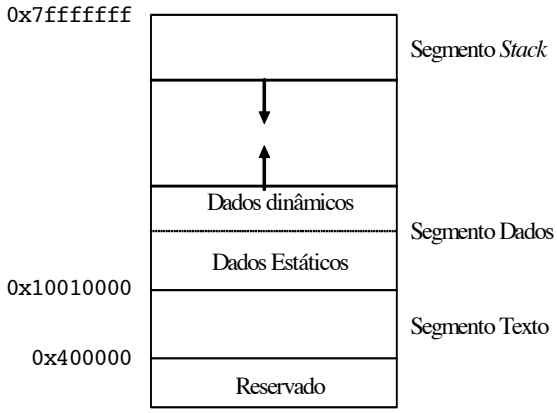


Figura 4 - A organização da memória

Esta divisão da memória em três segmentos não é a única possível. Contudo, ela possui duas características importantes: os dois segmentos dinâmicos estão o mais afastados possível um do outro e podem crescer no sentido de ocuparem a totalidade do espaço de endereçamento da memória.

Além dos três segmentos descritos existem ainda mais dois segmentos próprios do *kernel* do sistema. Eles são os segmentos de texto (**`.ktext`**) e de dados (**`.kdata`**) que começam, respectivamente, nos endereços **`0x80000180`** e **`0x9000000`**.

[6] Se pensarmos em termos de um programa em C esta é a área de memória onde são alocadas as variáveis definidas usando a função `malloc`.