Lenguaje ensamblador MIPS

MIPS

- MIPS (Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages) es una familia de microprocesadores RISC desarrollada por MIPS Technologies desde 1981 y por Wave Computing desde 2017.
- Usados, entre otros, en algunas consolas de videojuegos de Nintendo y Sony y sistemas empotrados como ruteadores Cisco, dispositivos Windows CE, gateways, etc.
- Más información en https://en.wikipedia.org/wiki/MIPS_instruction_set

MIPS

- El lenguaje ensamblador MIPS es sencillo y fácil de aprender.
- Principio de regularidad. Todas las instrucciones ocupan 4 bytes (32 bits).
- Principio de simplicidad. Instrucciones sencillas. Solo hay 3 formatos de instrucción.

Instrucciones

- Clases de instrucciones:
  - Aritméticas. Suma, resta, multiplicación, división.
  - Transferencia de datos. Carga (load) de la memoria a un registro, almacena (store) de un registro a la memoria.
  - Lógicas. AND, OR, corrimiento (shift).
  - Brincos condicionales.
  - Brincos incondicionales.
- Hay instrucciones para números reales y para enteros.

Operandos

- Registros.
- Memoria.

Registros

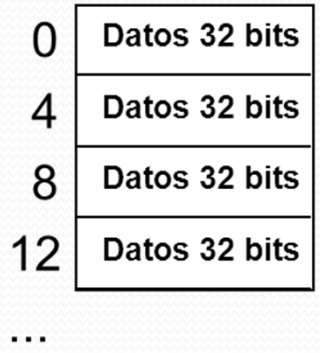
- Un registro es una memoria integrada en la CPU.
- Tienen poca capacidad, 4 bytes (32 bits) en MIPS, pero de acceso muy rápido.
- 32 registros enteros: $s0-$s7, $t0-$t9, $a0-$a3, $v0-$v1, $zero, $gp, $fp, $sp, $ra, $at.
- 32 registros float: $f0-$f31.
- Se usan para guardar valores temporales y resultados de operaciones aritméticas.
- En ese curso veremos solo instrucciones y registros enteros.

Registros

Nombre	Número	Uso
$zero	0	Constante cero
$at	1	Reservado
$v0-$v1	2-3	Valores de retorno de funciones
$a0-$a3	4-7	Argumentos de funciones
$t0-$t7	8-15	Temporales
$s0-$s7	16-23	Temporales salvados
$t8-$t9	24-25	Temporales
$k0-$k1	26-27	Reservados por el kernel del S.O.
$gp	28	Apuntador global
$sp	29	Stack pointer
$fp	30	Frame pointer
$ra	31	Dirección de retorno

Memoria

- Se usa para guardar variables.
- MIPS usa byte addressing.
- La dirección de una palabra es la dirección de su primer byte.
- La memoria está alineada.



Memoria

- Las palabras son de 4 bytes (32 bits).
- Los registros son de 4 bytes (32 bits).
- MIPS se puede configurar por hardware como big–endian o little–endian.
- Se usan 32 bits para direccionar la memoria.
- La memoria tiene:
- 2^{32} bytes con direcciones desde 0 hasta $2^{32} – 1$.
- 2^{30} palabras con direcciones desde 0 hasta $2^{32} – 4$.

Registros vs memoria

- La mayoría de las CPUs modernas mueven las variables de la memoria principal a los registros, operan sobre ellos y regresan el resultado a la memoria.
- A esto se le conoce como **arquitectura load/store**.
- MIPS emplea arquitectura load/store.

Instrucciones aritméticas

- add – suma de registros con overflow.
- addu – suma de registros sin overflow.
- addi – suma inmediata con overflow.
- addiu – suma inmediata sin overflow.
- sub, subu – restas con/sin overflow.
- div, divu – divisiones con/sin overflow.
- mult, multu – multiplicaciones con/sin overflow.

Instrucciones aritméticas

- Las sumas tienen 3 operandos.
- El orden de los operandos es fija (primero el operando destino y luego los fuentes).
- Hay dos tipos de sumas:
- Suma de registros: los dos operandos fuentes son registros.
- Suma inmediata: el primer operando es un registro y el segundo es una constante.

Instrucciones aritméticas

- Ejemplos de sumas de registros:

```
add $r0, $r1, $r2    # $r0 ← $r1 + $r2
addu $r0, $r1, $r2   # $r0 ← $r1 + $r2
```

$r0, $r1 y $r2 son registros con números de 32 bits con signo.

- La diferencia entre add y addu es que, si la suma genera overflow, add lo indica y addu lo ignora.

Instrucciones aritméticas

- Ejemplos de sumas inmediatas.

```
addi $r0, $r1, 20        # $r0 ← $r1 + 20
addiu $r0, $r1, 0x20     # $r0 ← $r1 + 32
```

$r0 y $r1 son registros con signo, la constante es de 16 bits con signo en base 8, 10 o 16.

- La diferencia entre addi y addiu es que, si la suma genera overflow, addi lo indica y addiu lo ignora.

Instrucciones aritméticas

- Las restas sub y subu funcionan de la misma manera.

  sub $r0, $r1, $r2 **# $r0 ← $r1 – $r2**

  subu $r0, $r1, $r2 **# $r0 ← $r1 – $r2**

  $r0, $r1 y $r2 son registros con signo.

- La diferencia entre sub y subu es que, si la resta genera overflow, sub lo indica y subu lo ignora.

Instrucciones aritméticas

- Las divisiones y multiplicaciones tienen dos argumentos.
- Dejan el resultado en dos registros especiales: LO y HI.
- Hay instrucciones para copiar datos de LO y HI a los registros normales.

Instrucciones aritméticas

```
mult $r0, $r1     # $r0 x $r1
multu $r0, $r1    # $r0 x $r1
```

- $r0 y $r1 tienen números con signo.
- LO tiene los 32 bits bajos del producto.
- HI tiene los 32 bits altos del producto.
- La diferencia entre mult y multu es que, si el producto genera overflow, mult lo indica y multu lo ignora.

Instrucciones aritméticas

```
div $r0, $r1     # $r0 / $r1
divu $r0, $r1    # $r0 / $r1
```

- $r0 y $r1 tienen números con signo.
- LO tiene el cociente ($r0 DIV $r1).
- HI tiene el residuo o módulo ($r0 MOD $r1).
- La diferencia entre div y divu es que, si la división genera overflow, div lo indica y divu lo ignora.

Transferencia desde LO/HI

- mflo – mueve el valor de LO a un registro regular.
- mfhi – mueve el valor de HI a un registro regular.

```
mflo $r    # $r ← LO
mfhi $r    # $r ← HI
```

Uso de la memoria

- Por convención, los sistemas basados en MIPS dividen la memoria en 3 segmentos:

1. Segmento de texto (text segment).
2. Segmento de datos (data segment).
3. Segmento de pila (stack segment).

Segmento de texto

- El segmento de texto, que comienza a partir de la dirección 400000_{16}, es donde se guarda el código del programa.
- En los programas, el segmento de texto se marca por medio de la directiva .text.

Segmento de datos

- El segmento de datos, que comienza en la dirección 10010000_{16}, es donde se guardan los datos. Se indica por medio de la directiva .data.
- A su vez, el segmento de datos consta de dos partes:

a) Datos estáticos. Contiene variables de tamaño fijo y que necesitan ser accesados durante todo el programa. Por ejemplo, variables globales.

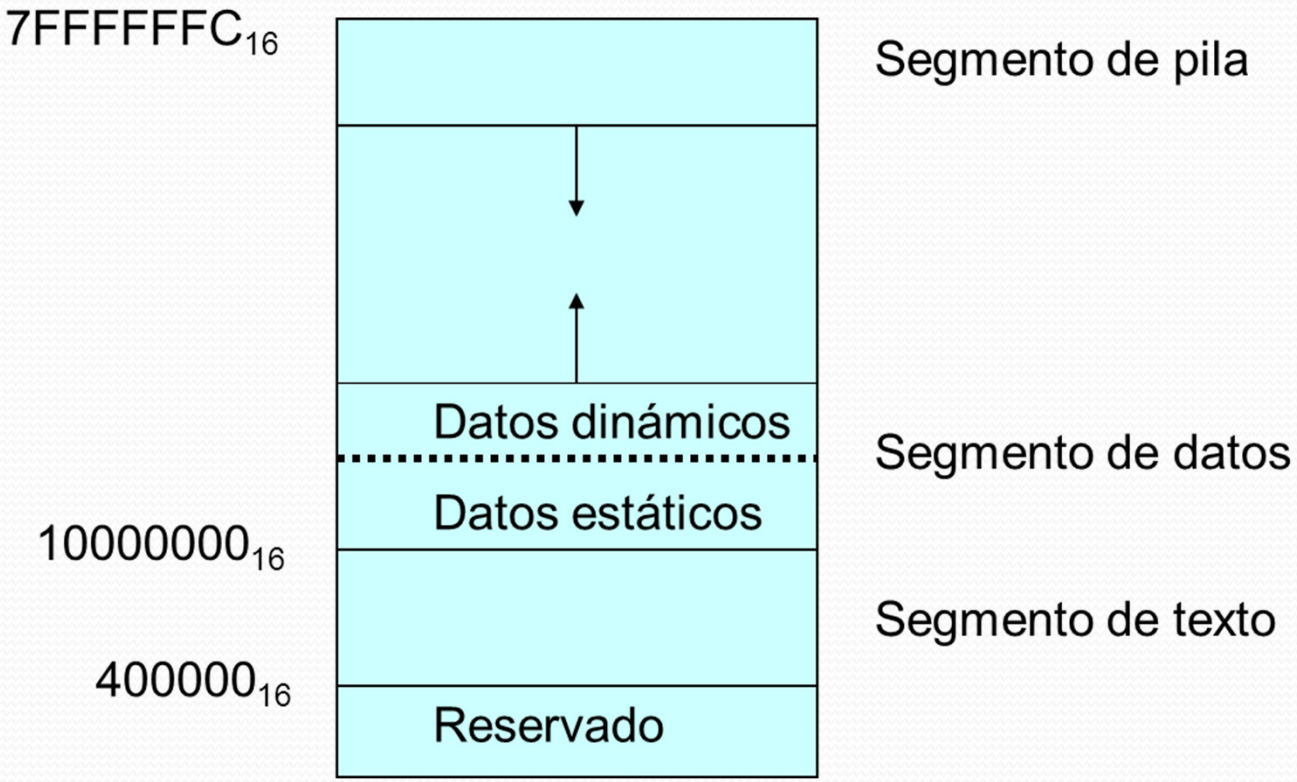
Segmento de datos

b) Datos dinámicos. Contiene variables que se crean durante el programa. Por ejemplo, espacio asignado con `malloc` en C, u objetos creados en Java. Llamado heap en inglés.

Segmento de pila

- El segmento de pila, que comienza en la dirección $7FFFFFFC_{16}$, es donde se guardan los stack frames.

Uso de la memoria



Transferencia de datos

- lw – mueve (carga) una palabra (4 bytes) de la memoria a un registro.
- sw – mueve (almacena) el valor de un registro (4 bytes) a la memoria.

Transferencia de datos

```
lw $r0, C($r1)    # $r0 ← Mem[$r1 + C]
```

- Copia (carga – load) una palabra (4 bytes) de la memoria a un registro.
- $r0 es el registro destino.
- $r1 es el registro base.
- C es el offset.
- La dirección de la palabra en la memoria es $r1 + C.

Transferencia de datos

```
sw $r0, C($r1)    # Mem[$r1 + C] ← $r0
```

- Copia (almacena – store) una palabra (4 bytes) de un registro a la memoria.
- $r0 es el registro fuente.
- $r1 es el registro base.
- C es el offset.
- La dirección de la palabra en la memoria es $r1 + C.

Variables

- Las variables se guardan en la memoria en el segmento de datos.
- Para hacer operaciones con ellas hay que pasarlas a los registros (arquitectura load/store).
- MIPS maneja varios tipos de variables.
- En ese curso solo se verán enteros, arreglos de enteros y strings.

Variables enteras

- Un entero se declara así:

```
x:      .word 17
```

- x es una etiqueta y funciona como nombre de la variable.
- La directiva .word está reservando una palabra (4 bytes).
- El número 17 es el valor inicial.
- Otra forma es ver a x como un apuntador al primer byte de una palabra que contiene al 17.

Variables enteras

- Para usar una variable hay que pasarla a un registro:
- Hay al menos dos formas.
- Una:

```
la $t0, x          # $t0 tiene la dirección de x
lw $t1, 0($t0)     # $t1 tiene el valor de x
```

- Otra:

```
lw $t1, x          # $t1 tiene el valor de x
```

Variables enteras

- Para guardar un registro en una variable hay al menos dos formas.
- Una:

```
la $t0, x          # $t0 tiene la dirección de x
sw $t1, 0($t0)  # Se actualiza la memoria con el valor de $t1
```

- Otra:

```
sw $t1, x          # Se actualiza la memoria con el valor de $t1
```

Variables enteras

- Los arreglos de enteros se verán más adelante.

Ejemplo

- Escribir un programa en MIPS para el siguiente código en C:

```
int a = 25;
int b = 17;
int c = a + b;
```

- Donde a, b y c son variables almacenadas en la memoria.

Segmento de datos

```
        .data
a:      .word 25
b:      .word 17
c:      .word -1
```

Segmento de texto

```
        .text
# carga a y b, hace la suma y la guarda en c
        lw $t0, a
        lw $t1, b
        add $t2, $t0, $t1
        sw $t2, c
```

Ejemplo

- Hacer un programa en MIPS para el siguiente código en C:

$$f = (g + h) - (i + j)$$

- Suponiendo que g, h, i, j tienen valores enteros y actualizando en la memoria la variable f.

Ejemplo

```
        .data
f:      .word -1
g:      .word 10
h:      .word 17
i:      .word 12
j:      .word -10
```

Ejemplo

```
.text
la $t0, g          # dirección de g
lw $s1, 0($t0)     # valor de g
la $t0, h          # dirección de h
lw $s2, 0($t0)     # valor de h
la $t0, i          # dirección de i
lw $s3, 0($t0)     # valor de i
la $t0, j          # dirección de j
lw $s4, 0($t0)     # valor de j
```

Ejemplo

```
# f = (g + h) – (i + j)
add $t0, $s1, $s2    # $t0 ← g + h
add $t1, $s3, $s4    # $t1 ← i + j
sub $s0, $t0, $t1    # $s0 ← $t0 - $t1
# actualizar f
la $t0, f
sw $s0, 0($t0)
```

Strings

- Un string se declara así:

```
mssg:    .asciiz "Hola mundo"
```

- mssg es una etiqueta y funciona como el nombre del string.
- La directiva .asciiz indica que es un string terminado en nulo (ASCII 0).
- "Hola mundo" es el valor inicial.
- Los strings se guardan empacados, 4 caracteres en una palabra.

Strings

- El uso más común de los strings es para imprimir mensajes en la consola.
- Para imprimir un string:

1. Obtener la dirección.

```
la $t0, mssg
```

2. Hacer una llamada al sistema con syscall.

Llamadas al sistema

- MIPS no tiene instrucciones de entrada y salida.
- MIPS ofrece llamadas al sistema a través de la instrucción `syscall`.
- Las llamadas permiten leer del teclado, escribir a la consola y manejar archivos del sistema.
- Para hacer una llamada, se carga el número de llamada en `$v0` y los argumentos en `$a0` – `$a3`.
- Las llamadas que regresan un valor lo hacen en `$v0`.

Llamadas al sistema

Servicio	Código	Argumentos	Resultado
print_int	1	$a0 = integer	
print_float	2	$f12 = float	
print_double	3	$f12 = float	
print_string	4	$a0 = string	
read_int	5		integer (en $v0)
read_float	6		float (en $v0)
read_double	7		double (en $v0)
read_string	8	$a0 = buffer, $a1 = tamaño	
sbrk	9	$a0 = cantidad	dirección (en $v0)
exit	10		
print_char	11	$a0 = char	
read_char	12		char (en $v0)
open	13	$a0 = nombre del archivo (string), $a1 = banderas, $a2 = modo	handle (en $a0)
read	14	$a0 = handle, $a1 = buffer, $a2 = tamaño	num. de caracteres leídos (en $a0)
write	15	$a0 = handle, $a1 = buffer, $a2 = tamaño	num. de caracteres escritos (en $a0)
close	16	$a0 = handle	
exit2	17	$a0 = result	

Ejemplo

- Hacer un programa completo en MIPS para el siguiente código en C:

```
int x = 10
int y = 7
int z = x + y
printf("La suma es: %d\n", z);
```

Segmento de datos

```
        .data
x:      .word 10
y:      .word 7
z:      .word -1
m:      .asciiz “La suma es: ”
enter:  .asciiz “\n”
```

Segmento de texto

```
        .text
# carga x y y, hace la suma y la guarda en z
        lw $t0, x
        lw $t1, y
        add $t2, $t0, $t1
        sw $t2, z
```

Segmento de texto

```
# imprime el string "La suma es:"
        addi $v0, $zero, 4
        la $a0, m
        syscall
# imprime la suma
        addi $v0, $zero, 1
        add $a0, $zero, $t2
        syscall
# imprime el enter
        addi $v0, $zero, 4
        la $a0, enter
        syscall
```

Segmento de texto

 # exit

```
addi $v0, $zero, 10    # servicio stop
syscall
```

Instrucciones extendidas

- Son instrucciones que un programa ensamblador reconoce pero que no existen en la definición del ISA.
- También llamadas seudo-instrucciones o seudos.
- El ensamblador mapea cada instrucción extendida a una o más instrucciones reales.
- Se usan para comodidad de los programadores.
- Algunas instrucciones extendidas no son standard. Dependen de cada programa ensamblador.

Instrucciones extendidas

- Por ejemplo, la instrucción extendida `li` (carga inmediata – load immediate) asigna una constante a un registro:

```
li $r, 17
```

- Un programa ensamblador la puede traducir a la siguiente instrucción básica:

```
addiu $r, $zero, 17
```

Instrucciones extendidas

- Otro ejemplo es move que copia el valor de un registro a otro registro:

```
move $r1, $r2
```

- Un programa ensamblador la puede traducir a la siguiente instrucción básica:

```
addu $r1, $r2, $zero
```

Instrucciones extendidas

- Resumen:

Nombre	Sintaxis	Significado
Carga inmediata	li $r, C	$r = C
Copia de registro	move $r1, $r2	$r1 = $r2
Carga de dirección	la $r, L	$r = L
Variante de carga	lw $r, L	$r = mem[L]
Variante de store	sw $r, L	mem[L] = $r

Lenguaje máquina

- El lenguaje de máquina se guarda en binario.
- El programa ensamblador traduce cada instrucción a lenguaje de máquina.
- Por ejemplo, la instrucción

  add $t0, $s1, $s2

- se traduce en binario a

  $0000001000110010010010000010000{0}_2$

  → 02324820_{16}

Lenguaje máquina

- 00000010001100100100100000100000 se descompone en los siguientes campos:

- 000000 es el código de todas las instrucciones R.
- 10001 es el número del registro $s1.
- 10010 es el número del registro $s2.
- 01001 es el número del registro $t0.
- 00000 es el campo shamt (add no lo usa).
- 100000 es el código de la suma de registros.

Lenguaje máquina

- En general, la instrucción

  add destino, fuente1, fuente2

- genera el código máquina

  000000fffffggggggddddd00000100000

- donde:
- 000000 es el código de todas las instrucciones R.
- fffff es el número del registro fuente 1.
- ggggg es el número del registro fuente 2.
- ddddd es el número del registro destino.
- 00000 es el shamt (add no lo usa).
- 100000 es el código de la suma de registros.

Formatos de instrucción

- En MIPS hay 3 formatos de instrucción:

- Formato R. Todos los operandos son registros.
- Formato I. Hay un operando inmediato (número).
- Formato J. La instrucción es un brinco (jump).

Formatos de instrucción

- Ejemplos:

- Formato R.

```
add $t0, $s1, $s2      # $t0 = $s1 + $s2
```

- Formato I.

```
addi $t0, $s1, C       # $t0 = $s1 + C [número de 16 bits]
```

- Formato J.

```
j C                    # brinca a C [dirección de 26 bits]
```

Formatos de instrucción

Type	-31-	format (bits)				-0-
R	opcode (6)	rs (5)	rt (5)	rd (5)	shamt (5)	funct (6)
I	opcode (6)	rs (5)	rt (5)	immediate (16)		
J	opcode (6)	address (26)				

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/MIPS_instruction_set#MIPS_instruction_formats

Ejemplos

Name	Format	Example						Comments
add	R	0	18	19	17	0	32	add $s1,$s2,$s3
sub	R	0	18	19	17	0	34	sub $s1,$s2,$s3
addi	I	8	18	17	100			addi $s1,$s2,100
lw	I	35	18	17	100			lw $s1,100($s2)
sw	I	43	18	17	100			sw $s1,100($s2)
Field size		6 bits	5 bits	5 bits	5 bits	5 bits	6 bits	All MIPS instructions are 32 bits long
R-format	R	op	rs	rt	rd	shamt	funct	Arithmetic instruction format
I-format	I	op	rs	rt	address			Data transfer format

Fuente: COD 5, p. 85

Operaciones lógicas

- Operan sobre números.
- Principales operaciones lógicas.

Logical operations	C operators	Java operators	MIPS instructions
Shift left	<<	<<	sll
Shift right	>>	>>>	srl
Bit-by-bit AND	&	&	and, andi
Bit-by-bit OR	|	|	or, ori
Bit-by-bit NOT	~	~	nor

FIGURE 2.8 C and Java logical operators and their corresponding MIPS instructions. MIPS implements NOT using a NOR with one operand being zero.

Fuente: COD 5, p. 87

Operaciones lógicas

- sll – corrimiento (shift) a la izquierda.
- Ejemplo:

  sll $t2, $s0, 4 **# en C: t2 = s0 << 4**

- Si $s0 vale 9:

  0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 1001

- $t2 valdrá 144 (9 x 2^4)

  0000 0000 0000 0000 0000 0000 1001 0000

Operaciones lógicas

- Código binario generado por sll $t2, $s0, 4:

op	rs	rt	rd	shamt	funct
0	0	16	10	4	0

Operaciones lógicas

- Otras operaciones lógicas:
- Corrimiento a la izquierda variable.

```
sllv $r0, $r1, $r2    # $r0 ← $r1 << $r2
```

- Corrimiento a la derecha.

```
srl $r0, $r1, C       # $r0 ← $r1 >> C
```

Operaciones lógicas

- Corrimiento a la derecha variable.

  srlv $r0, $r1, $r2 **# $r0 ← $r1 >> $r2**

- AND.

  and $r0, $r1, $r2 **# $r0 ← $r1 & $r2**

  andi $r0, $r1, C **# $r0 ← $r1 & C**

- OR.

  or $r0, $r1, $r2 **# $r0 ← $r1 | $r2**

  ori $r0, $r1, C **# $r0 ← $r1 | C**

Operaciones lógicas

```
xor $r0, $r1, $r2    # r0 ← $r1 ^ $r2
xori $r0, $r1, C     # r0 ← $r1 ^ C
nor $r0, $r1, $r2    # r0 ← $r1 nor $r2
```

- Se puede usar como operador not

```
nor $r0, $r1, $zero     # r0 ← not $r1
```

- (a + 0)' → a' . 1 → a'

Operaciones lógicas

- ¿Para qué sirven las operaciones lógicas?
- Los corrimientos a la izquierda (sll y sllv) son una manera rápida de multiplicar un número por una potencia de 2.
- Los corrimientos a la derecha (srl y srlv) son una manera rápida de dividir un número positivo entre una potencia de 2.
- El and, or y los corrimientos se pueden usar para extraer y guardar datos dentro de un número.

Operaciones lógicas

- Ejemplo de extracción de un dato.
- Dado un número binario.

  x = 11100101

- Se desea extraer la información que está en los bits 2 al 5.
- Recordar que los bits se numeran de derecha a izquierda.

Operaciones lógicas

- Dato original.

  x = 11100101

- Se hace un AND con la máscara 00111100:

  t = x & 00111100

- Ahora t vale 00100100
- Se hace un corrimiento a la derecha:

  t = t >> 2

- Ahora t vale 00001001 y es lo que se deseaba.

Operaciones lógicas

- Ejemplo de guardar datos en un número.
- Guardar los siguientes datos en un número binario de 16 bits:
- 101 en los bits 1 al 3.
- 0111 en los bits 8 al 11.
- 11 en los bits 14 y 15.
- Dejando los demás en 0.

Operaciones lógicas

- 101 en los bits 1 al 3:

  t = 0000000000000101 << 1

- Ahora t vale 0000000000001010.
- 0111 en los bits 8 al 11:
- Se hace un OR con la máscara 011100000000

  t = t | 011100000000

- Ahora t vale 0000011100001010

Operaciones lógicas

- 11 en los bits 14 y 15.
- Se hace un OR con la máscara 1100000000000000.
- t = t | 1100000000000000
- Ahora t vale 1100011100001010 que es lo que se deseaba.

Operaciones lógicas

- Para hacer máscaras recordar:

- x AND 0 = 0
- x AND 1 = x
- x OR 0 = x
- x OR 1 = 1

Instrucciones de control

- Alteran el flujo de control.
- En otras palabras, cambian la siguiente instrucción que será ejecutada.
- Brincos condicionales (branches).
- Brincos incondicionales (jumps).

Brincos condicionales

- En MIPS hay dos instrucciones de brinco condicional:

1. beq $s, $t, C **# brinca a la dirección C si $s == $t**

2. bne $s, $t, C **# brinca a la dirección C si $s != $t**

Brincos condicionales

- Ejemplo:

C:

```
if (i == j)
    h = i + j;
```

MIPS:

```
        bne $t1, $t2, L1        # $t1: valor de i, $t2: valor de j
        add $t0, $t1, $t2       # $t0: valor de h
L1:     …
```

Brincos incondicionales

- En MIPS hay tres instrucciones de brinco incondicional:

1. j C **# brinca a la dirección C**
2. jr $r **# brinca a la dirección guardada en $r**
3. jal C **# llama al procedimiento que comienza en C**
   # la dirección de regreso se guarda en $ra
   # es decir, se regresa con jr $ra

Ejemplo de jump

C:

```
if (i != j)
    h = i + j;
else
    h = i – j;
```

MIPS:

```
        bne $s1, $s2, L1        # $s1 = i, $s2 = j
        sub $s0, $s1, $s2       # $s0 = h
        j L2                    # brinca al final
L1:     add $s0, $s1, $s2       # $s0 = h
L2:     …
```

Ejemplo de jal y jr

C:

```
main()
{
    …
    foo ();
    …
}

void foo ()
{
…
}
```

Ejemplo de jal y jr

MIPS:

```
        …
        jal foo         # brinca a foo, guarda la dirección de
        …               # regreso en el registro $ra

foo:    …
        …
        jr $ra          # regresa al programa principal
```

Brincos

- MIPS tiene `beq` (brinca si es igual) y `bne` (brinca si no es igual).
- ¿Y si la condición es `if (i < j)`?
- Hay dos soluciones:

a) Usar una instrucción extendida (código más entendible).

b) Usar la instrucción básica `slt` (código no tan entendible).

slt

- Set if less than:

```
slt $t0, $t1, $t2
```

- $t0 vale 1 si $t1 es menor que $t2 y vale 0 en otro caso.
- Equivale en seudo C a

```
$t0 = ($t1 < $t2)
```

- slt se usa junto con beq o bne para condiciones tipo if (i < j) o if (i <= j).

Un ejemplo de slt

C:

```
if (i < j)
    h = i + j;
else
    h = i – j;
```

MIPS:

```
        slt $s3, $s1, $s2       # $s1 = i, $s2 = j $s3 = i < j
        beq $s3, $zero, L1      # $zero siempre vale 0
        add $s0, $s1, $s2       # then h = i + j
        j L2                    # brinca al final
L1:     sub $s0, $s1, $s2       # else h = i – j
L2:     …
```

Otro ejemplo de slt

C:

```
if (i <= j)
    h = i + j;
else
    h = i – j;
```

MIPS:

```
        beq $s1, $s2, L3        # brinca si $s1 == $s2
        slt $s3, $s1, $s2       # checa su $s1 < $s2
        beq $s3, $zero, L1      # $zero siempre vale 0
L3:     add $s0, $s1, $s2       # then h = i + j
        j L2                    # brinca al final
L1:     sub $s0, $s1, $s2       # else h = i – j
L2:     …
```

Instrucciones extendidas de brincos

- Principales instrucciones extendidas de brincos:

Nombre	Sintaxis	Significado
Brinca si mayor que	bgt $r, $t, L	Si r > t goto L
Brinca si menor que	blt $r, $t, L	Si r < t goto L
Brinca si mayor que o igual	bge $r, $t, L	Si r >= t goto L
Brinca si menor que o igual	ble $r, $t, L	Si r <= t goto L
Brinca si mayor que sin signo	bgtu $r, $t, L	Si r > t goto L
Brinca si mayor que cero	bgtz $r, L	Si r > o goto L

Un ejemplo

C:

```
if (i < j)
    h = i + j;
else
    h = i – j;
```

MIPS:

```
        blt $s1, $s2, L1        # $s1 = i, $s2 = j
        sub $s0, $s1, $s2       # else h = i – j
        j L2                    # brinca al final
L1:     add $s0, $s1, $s2       # then h = i + j
L2:     …
```

Otro ejemplo

C:

```
if (i <= j)
    h = i + j;
else
    h = i – j;
```

MIPS:

```
        ble $s1, $s2, L1        # $s1 = i, $s2 = j
        sub $s0, $s1, $s2       # else h = i – j
        j L2                    # brinca al final
L1:     add $s0, $s1, $s2       # then h = i + j
L2:     …
```

Traducción mecánica de ciclos

- Dado un ciclo while, do-while, for en C o Java, traducirlo a MIPS.
- Es una de las primeras tareas al diseñar un compilador.

Ciclo while

```
while (condición) {
        instrucciones;
}
```

Seudo MIPS:

```
L1:     if condicion == false goto L2
        instrucciones
        goto L1
L2:     …
```

Ejemplo de while

```
while (i <= j) {
        instrucciones;
}

L1:     bgt $s0, $s1, L2    # $s0 = i, $s1 = j
        instrucciones
        j L1
L2:     …
```

Ciclo for

```
for (precondición; condición; postcondición) {
        instrucciones;
}
```

Seudo MIPS:

```
        precondición
L1:     if condición == false goto L2
        instrucciones
        postcondición
        j L1
L2:
```

Ejemplo de for

```
for (int i = 0; i < 10; i++) {
        instrucciones;
}
```

```
        li $t0, 0           # $t0 = i
L1:     bge $t0, 10, L2     # if i >= 10 goto L2
        instrucciones
        addi $t0, $t0, 1    # i++
        j L1
L2:     …
```

Ciclo do-while

```
do {
        instrucciones;
} while (condición);
```

- Seudo MIPS:

```
L1:     instrucciones
        if condición == true goto L1
        …
```

Ejemplo de do-while

```
do {
        instrucciones;
} while (i == j);
```

```
L1:     instrucciones
        beq $t0, $t1, L1    # $t0 = i, $t1 = j
        …
```

Arreglos de enteros

- Se declaran en el segmento de datos usando la directiva .word.
- Ejemplo

```
a:    .word 7, 2, 1, 9, 10   # arreglo
n:    .word 5                # tamaño
```

Arreglos de enteros

- Para accesar los elementos:

```
la $t0, a          # $t0 tiene la dirección de a[0]
lw $s0, 0($t0)     # $s0 = a[0]
lw $s1, 4($t0)     # $s1 = a[1]
lw $s2, 8($t0)     # $s2 = a[2]
```

- …
- Notar que el offset debe ser una constante.

El primer ejemplo

```
swap(int v[], int k)
{ int temp;
  temp = v[k]
  v[k] = v[k+1];
  v[k+1] = temp;
}
```

```
swap:
    muli $v0, $a1, 4
    add $v0, $a0, $v0
    lw $t7, 0($v0)
    lw $s0, 4($v0)
    sw $s0, 0($v0)
    sw $t7, 4($v0)
    jr $ra
```

El primer ejemplo

```
swap:
    muli $v0, $a1, 4      # v0 ← a1 x 4, a1 tiene el valor de k
    add $v0, $a0, $v0     # v0 ← a0 + v0, a0 apunta a v[0], v0 apunta a v[k]
    lw $t7, 0($v0)        # t7 ← mem[v0], t7 tiene el valor de v[k]
    lw $s0, 4($v0)        # s0 ← mem[v0 + 4], t7 tiene el valor de v[k + 1]
    sw $s0, 0($v0)        # mem[v0] ← s0, s0 se guarda en v[k]
    sw $t7, 4($v0)        # mem[v0 + 4] ← t7, t7 se guarda en v[k + 1]
    jr $ra                # return
```

El primer ejemplo

- En C

```
swap (int v[], int k)
{
        int t1 = v[k];
        int t2 = v[k + 1];
        v[k] = t2;
        v[k + 1] = t1;
}
```

Ejemplo 1

- Generar el código MIPS para:

$$a[12] = h + a[8]$$

- Suponiendo que el valor de h está en $s2 y que la dirección del arreglo a está en $s3.

Ejemplo 1

```
# a[12] = h + a[8]
lw $t0, 32($s3)      # t0 ← a[8]
add $t0, $s2, $t0    # t0 ← h + a[8]
sw $t0, 48($s3)      # a[12] ← t0
```

Ejemplo 2

- Traducir a MIPS el siguiente código en C:

```
while (save[i] == k)
    i++;
```

- Suponiendo que:
- i está en $s3, k en $s5 y la dirección del arreglo save está en $s6.

Ejemplo 2

```
Loop:
    sll $t1, $s3, 2          # $t1 = i * 4
    add $t1, $t1, $s6        # $t1 = address of save[i]
    lw $t0, 0($t1)           # $t0 = save[i]
    bne $t0, $s5, Exit       # go to Exit if save[i] ≠ k
    addi $s3, $s3, 1         # i = i + 1
    j Loop                   # go to Loop
Exit:
```

Ejemplo 3

- Traducir a MIPS este código en C:

```
int a[] = {7, 10, 2, 9, 8};
int i, n = 5, suma = 0;
for (i = 0; i < n; i++) {
    suma += a[i];
}
printf("La suma es: %d\n", suma);
```

Segmento de datos

```
        .data
a:      .word 7, 10, 5, 9, 8
n:      .word 5
suma:   .word 0
mssg:   .asciiz “La suma es: ”
enter:  .asciiz “\n”
```

Segmento de texto

```
# Parte inicial
.text
li $t0, 0        # i
lw $t1, n        # t1 = n
li $t2, 0        # suma
la $t3, a        # t3 = &a[0]
```

Segmento de texto

```
# Ciclo de suma
for:    bge $t0, $t1, fin
        lw $t4, 0($t3)          # t4 = a[t3]
        add $t2, $t2, $t4       # suma
        addi $t0, $t0, 1        # i++
        addi $t3, $t3, 4        # apuntador
        j for
```

Segmento de texto

```
# Actualiza suma en la memoria
fin:    la $t5, suma
        sw $t2, 0($t5)
```

Segmento de texto

```
# Imprime
li $v0, 4          # print mssg
la $a0, mssg
syscall
li $v0, 1          # print suma
move $a0, $t2
syscall
li $v0, 4          # print enter
la $a0, enter
syscall
```

Segmento de texto

```
# Stop
li $v0, 10
syscall
```

Llamadas a funciones

- En lenguajes de alto nivel (C, Java) las llamadas a procedimiento son transparentes al usuario.
- En ensamblador, el programador debe implementar las llamadas y retorno de procedimiento.
- Las llamadas y regreso de procedimiento involucran manejar bloques de memoria llamados call frames o stack frames.
- Los frames se guardan en el segmento de pila.

Llamadas a funciones

- Hay dos componentes en una llamada:
  - La función que invoca o llamador (caller).
  - La función invocada o llamada (callee).
- Ejemplo

```
void main()          // llamador
{
   foo();
}
void foo()           // llamado
{
}
```

En MIPS

```
        .text
        …
        jal foo         # brinca a foo, guarda la dirección
        …               # de regreso en el registro $ra

foo:    …
        …
        jr $ra          # regresa al programa principal
```

Llamadas a funciones

- La instrucción jal no puede tener argumentos.
- No hay un equivalente a:

```
a = foo(x, y, z);
```

- Los argumentos se pasan en registros antes de llamar a jal.
- De la misma forma no hay un equivalente a:

```
return w;
```

- La función llamada debe regresar valores en los registros.

Llamadas a funciones

- Por convención los registros $a0, $a1, $a2 y $a3 se usan para pasar argumentos.
- Y los registros $v0 y $v1 para regresar valores al llamador.

Llamadas a funciones

- ¿Una función tiene derecho a que los registros mantengan su valor después de llamar a otra función?

```
# Antes de la llamada
        li $t0, 77
# Llamada
        jal foo
# Después de la llamada
        addi $t1, $t0, $zero
```

Registros

- Hay una convención de que registros deben ser guardados por el llamado.
- El llamador tiene derecho a esperar que esos registros mantengan su valor después de hacer una llamada a una función.

Registros

Nombre	Número	Uso	¿Salvado por el llamado?
$zero	0	Constante cero	No aplica
$at	1	Reservado	No
$vo-$v1	2-3	Valores de retorno de funciones	No
$ao-$a3	4-7	Argumentos de funciones	No
$to-$t7	8-15	Temporales	No
$so-$s7	16-23	Temporales salvados	**Si**
$t8-$t9	24-25	Temporales	No
$ko-$k1	26-27	Reservados por el kernel del S.O.	No
$gp	28	Apuntador global	**Si**
$sp	29	Stack pointer	**Si**
$fp	30	Frame pointer	**Si**
$ra	31	Dirección de retorno	No aplica

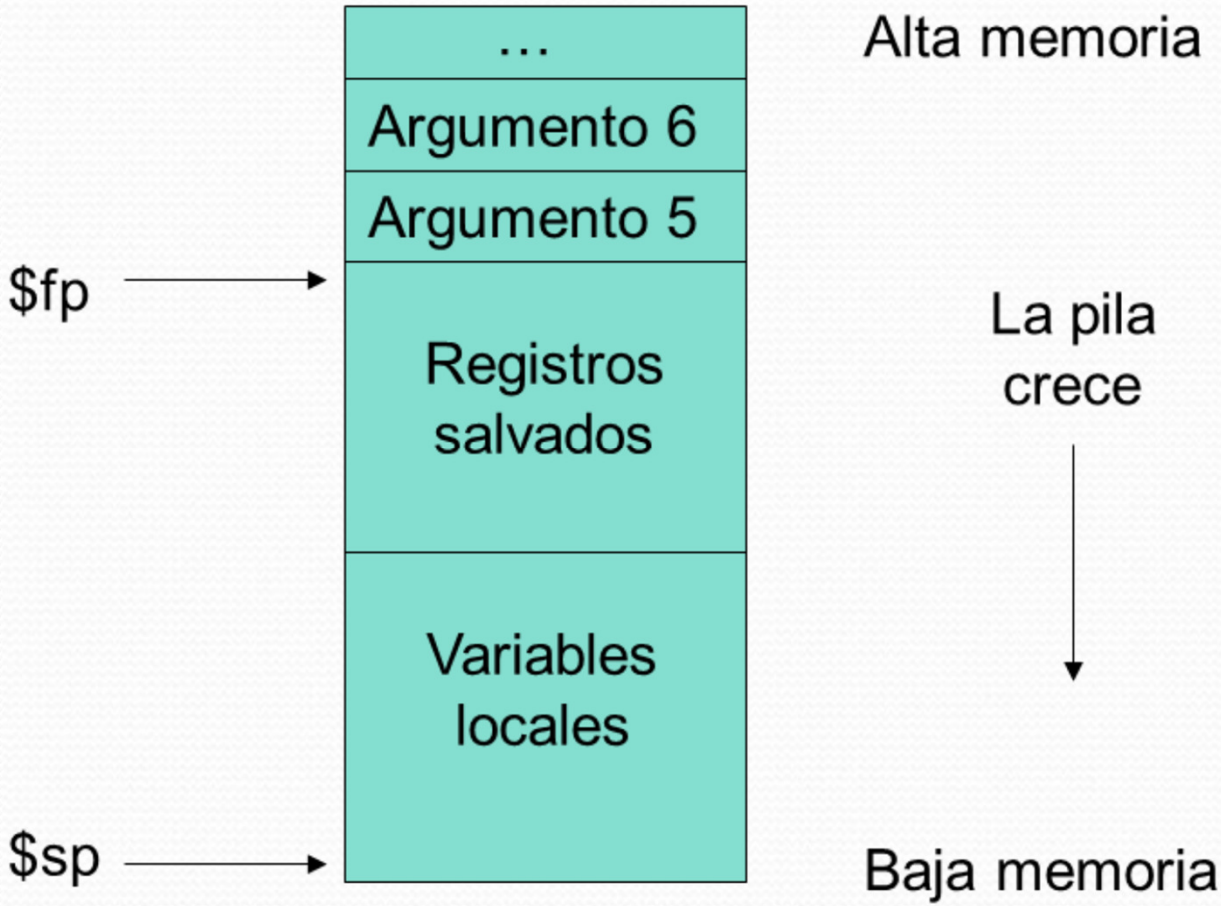
Registros

- El llamador si tiene derecho a esperar que los registros $s0 a $s7, $gp, $sp y $fp mantengan sus valores después de una llamada.
- Si al llamador le interesa preservar el valor de algún otro registro debe guardarlo antes de llamar a una función.
- El llamado debe guardar los registros que vaya a usar y dejarlos como estaban antes de regresar.
- Además, si el llamado a su vez llama a otra función debe guardar el registro $ra.

Stack frame

- El llamado utiliza una estructura llamada stack frame para guardar esos registros.
- Los stack frames se guardan en el segmento de pila.
- El stack frame guarda:
  - Argumentos (a partir del quinto) al procedimiento.
  - Los registros que se deben preservar.
  - Las variables locales al procedimiento.
- Se puede usar el frame pointer ($fp) para accesar datos en el stack frame.

Stack frame


...
Argumento 6
Argumento 5
$fp
Registros salvados
Variables locales
$sp
Alta memoria
La pila crece
Baja memoria

Antes de la llamada

- El llamador hace lo siguiente:

1. Pasar argumentos. Por convención, los primeros 4 argumentos van en $a0 a $a3. Los demás argumentos se pasan en la pila.
2. Guarda los registros. No hay garantía que $a0 a $a3 ni $t0 a $t9 mantengan su valor después de la llamada. Si el llamador espera usar alguno de esos registros, debe salvarlos en la pila.
3. Ejecuta una instrucción jal. La dirección de regreso se guarda en $ra automáticamente.

Después de la llamada

- El llamado, antes de correr, hace lo siguiente:

1. Reservar espacio para el frame, restándole al stack pointer el tamaño del frame.
2. Salvar los registros $s0 a $s7 si es que se usan en el procedimiento. $fp debe salvarse, $gp debe salvarse si se usa y $ra solo en caso de que la función haga a su vez una llamada.
3. Dejar a $fp apuntando al comienzo del frame, sumando al stack pointer el tamaño del frame menos 4.

Antes de regresar

- El llamado hace lo siguiente:

1. Si el llamado regresa un valor, guardar el valor en $v0.
2. Restaurar los registros que se salvaron al comienzo.
3. Eliminar (pop) el stack frame sumándole el tamaño del frame al stack pointer.
4. Brincar a la dirección almacenada en $ra.

Ejemplo

- Traducir a MIPS el siguiente código en C:

```
void main()
{
        int valor = foo(7, 10, 5, 4);
        printf("%d\n", valor);
}
int foo (int g, int h, int i, int j)
{
        int f = (g + h) – (i + j);
        return f;
}
```

Segmento de datos

```
                .data
valor:          .word 0
mssg:           .asciiz “El valor es: ”
```

Segmento de texto

 # Guarda los argumentos y hace la llamada

```
.text
li $a0, 7
li $a1, 10
li $a2, 5
li $a3, 4
jal foo
```

Segmento de texto

```
# Después de la llamada se actualiza valor y se imprime el mensaje y el valor.
        move $t0, $v0     # foo regresa la suma en $v0
        sw $t0, valor     # actualiza valor
        li $v0, 4         # print mssg
        la $a0, mssg
        syscall
        li $v0, 1         # print valor
        move $a0, $t0
        syscall
        li $v0, 10        # stop
        syscall
```

Segmento de texto

 # Prólogo de la función.

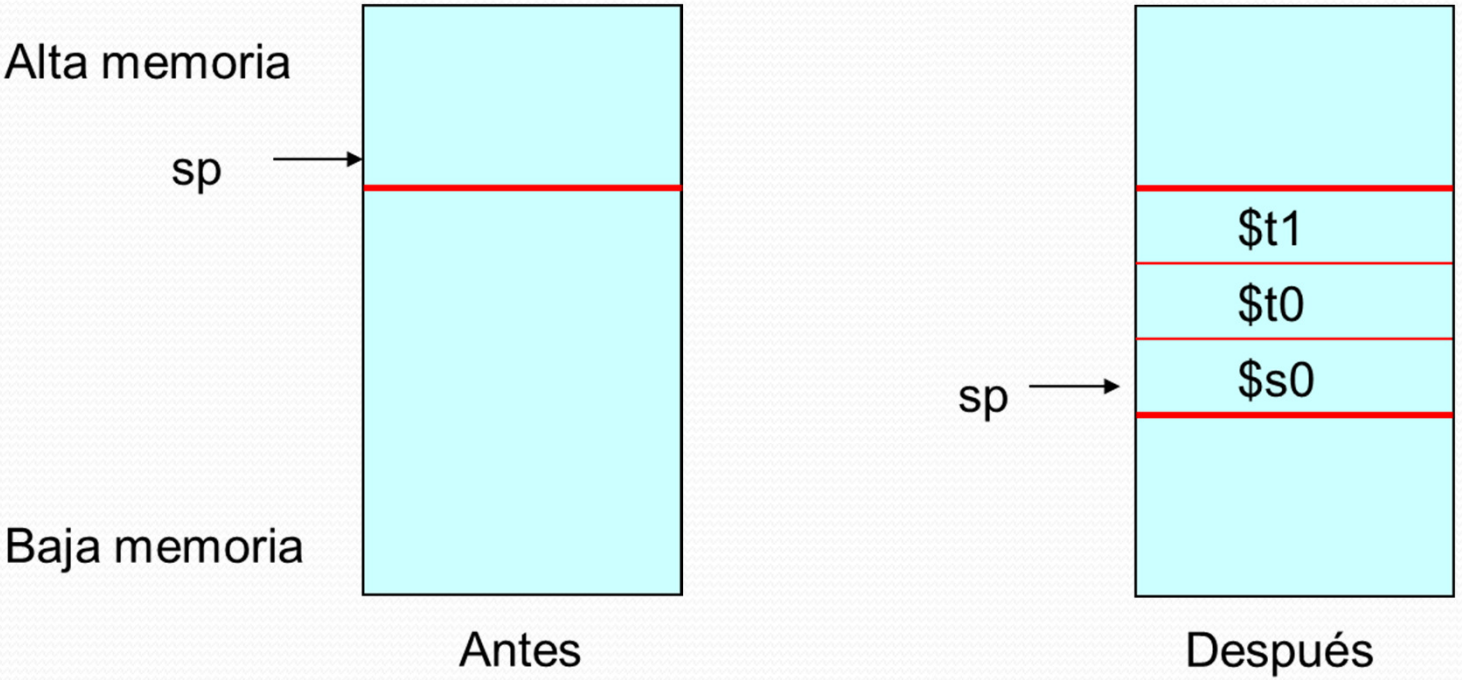
 # Reserva espacio en la pila para el frame.

 # Salva los registros que se van a usar: $s0, $t0 y $t1.

```
foo:    addi $sp, $sp, -12      # el frame ocupa 12 bytes
        sw $t1, 8($sp)          # guarda $t1
        sw $t0, 4($sp)          # guarda $t0
        sw $s0, 0($sp)          # guarda $s0
```

Pila

- Pila del sistema antes y después de guardar el stack frame de foo.



Segmento de texto

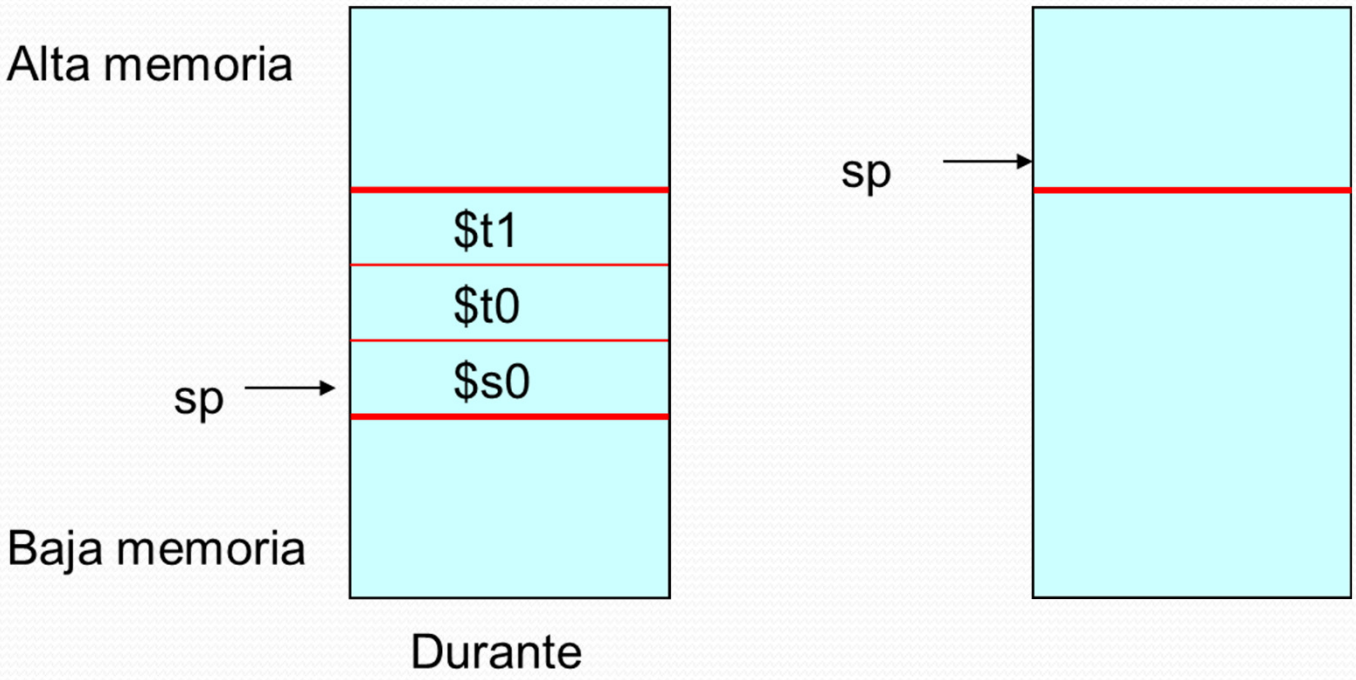
```
# Código del procedimiento.
# Los argumentos g, h, i, y j están en $a0, $a1, $a2 y $a3,
respectivamente.

add $t0, $a0, $a1      # $t0 = g + h
add $t1, $a2, $a3      # $t1 = i + j
sub $s0, $t0, $t1      # $s0 = $t0 - $t1
move $v0, $s0          # el valor se regresa en $v0
```

Segmento de texto

```
# Epílogo de la función.
# Restaura los valores de $t0, $t1 y $s0 sacándolos de la pila.
# Regresa el control al procedimiento llamador.
        lw $s0, 0($sp)          # restaura $s0
        lw $t0, 4($sp)          # restaura $t0
        lw $t1, 8($sp)          # restaura $t1
        addi $sp, $sp, 12       # ajusta la pila
        jr $ra                  # brinca al llamador
```

Pila

- Pila del sistema antes y después de que foo regrese.



Constantes de 32 bits

- A veces se necesita manejar constantes o direcciones de 32 bits.
- La instrucción addi tiene formato I y solo maneja constantes de 16 bits.

Name	Fields						Comments
Field size	6 bits	5 bits	5 bits	5 bits	5 bits	6 bits	All MIPS instructions are 32 bits long
R-format	op	rs	rt	rd	shamt	funct	Arithmetic instruction format
I-format	op	rs	rt	address/immediate			Transfer, branch, imm. format
J-format	op	target address					Jump instruction format

```
addi $t0, $zero, 0x1234
```

Constantes de 32 bits

- Para cargar constantes de 32 bits se utilizan dos instrucciones:
- lui – load upper immediate.
- ori – OR immediate.

Ejemplo

- Cargar 0000 0000 0011 1101 0000 1001 0000 0000 en $s0.
- Se escribe en base 16: 0x003d0900

```
lui $s0, 0x3d
ori $s0, $s0, 0x0900
```

Addressing modes

- Especifica cómo calcular la dirección de memoria efectiva de un operando.
- Se utiliza la información contenida en registros y/o constantes contenidas dentro de una instrucción.

Direcciones en jumps

- Los jumps utilizan el formato J: 6 bits para el opcode y 26 bits para la dirección.
- Ejemplo:

```
39700          j Label
  …             ...
40000 Label: …
```

- La instrucción j genera el siguiente código:

Direcciones en jumps

- Donde:
- 2 es el opcode de `j`.
- 10000 es la dirección en palabras.
- A esto se le llama **direccionamiento seudodirecto**.

Direcciones en branches

- Los brincos condicionales (branches) son relativos al contador de programa (PC).
- Ejemplo:

```
1000        beq $s0, $s1, Exit
 …                  …
1400 Exit:          …
```

- Genera el siguiente código:

```
000100 10000 10001 0000000001100011
    beq     $s0     $s1          99
```

Direcciones en branches

- Por conveniencia, el PC se incrementa en 4 *antes* de checar la condición.
- El brinco es relativo a la siguiente instrucción (PC + 4).
- La diferencia se calcula en palabras no en bytes.
- Hay 99 palabras entre 1004 y 1400.
- A esto se le llama **direccionamiento relativo al PC**.

Ejemplo

```
Loop:sll $t1,$s3,2      # Temp reg $t1 = 4 * i
     add  $t1,$t1,$s6   # $t1 = address of save[i]
     lw   $t0,0($t1)    # Temp reg $t0 = save[i]
     bne  $t0,$s5, Exit # go to Exit if save[i] ≠ k
     addi $s3,$s3,1     # i = i + 1
     j    Loop          # go to Loop
Exit:
```

If we assume we place the loop starting at location 80000 in memory, what is the MIPS machine code for this loop?

80000	0	0	19	9	2	0
80004	0	9	22	9	0	32
80008	35	9	8	0		
80012	5	8	21	2		
80016	8	19	19	1		
80020	2	20000				
80024	...					

Brincos lejanos

- beq y bne son formato I.
- Solo hay 16 bits para guardar el offset del brinco.
- Para brincos lejanos se puede usar un j.
- Por ejemplo

```
    beq $s0, $s1, L1
```

- Se puede reemplazar por:

```
    bne $s0, $s1, L2
    j L1
L2: …
```

Adressing modes en MIPS

1. Registro. La dirección está en un registro. Ej: `jr $ra`
2. Base. La dirección se obtienen por la suma de un registro base y una constante. Ej: `lw $s0, 4($t0)`
3. Relativo al PC. La dirección es la suma del PC y una constante. Ej: `beq $s0, $s1, L1`
4. Seudodirecto. La dirección consta de los 26 bits guardados en la instrucción concatenados con la parte alta del PC. Ej: `j Loop`

Resumen

- Instrucciones sencillas, todas de 32 bits.
- Tres formatos de instrucción:
  - R – los operandos son registros.
  - I – un operando es inmediato.
  - J – brincos.

Resumen

- Arquitectura load/store.
- Las únicas instrucciones que accesan la memoria son las instrucciones de transferencia de datos.
- Byte addressing con memoria alineada.
- Las palabras tienen direcciones múltiplos de 4.
- 2^{32} bytes con direcciones de 0 a $2^{32} – 1$.

Resumen

- El registro $zero siempre contiene 0.
- Los registro $at, $k0, $k1 están reservados y no deben usarse en programas.
- Los registros $gp, $sp, $fp y $ra son de propósito especial.
- En particular $sp, $fp y $ra se usan en las llamadas.
- El registro $gp es el apuntador global (global pointer). Se puede usar para apuntar al final de los datos estáticos y comienzo de los datos dinámicos (heap).

Resumen

- El registro $sp es el stack pointer, que apunta al tope de la pila.
- El registro $fp es el frame pointer. Se puede usar para apuntar al stack frame.
- $ra guarda la dirección de retorno de una llamada a función. La instrucción jal actualiza $ra de forma automática.

Resumen

- Los registros $t0 a $t9 se usan para valores temporales de vida corta.
- Los registros $s0 a $s7 se usan para valores temporales de vida larga.
- Los registros $a0 a $a3 se usan para pasar argumentos.
- Los registros $v0 y $v1 se usan para regresar valores.