

Tema 5: Ensamblador para la CPU Teórica

5.1- Introducción al Lenguaje Ensamblador

5.2- Ensamblador para la CPU Teórica

5.2.1 – Formato del Lenguaje para la CPU Teórica

5.2.2 – Control del Flujo de Ejecución

5.2.3 – La Pila

5.2.4 – Subrutinas



5.1- Introducción al Lenguaje Ensamblador

- El **código máquina** es una codificación en sistema binario, de una instrucción o de un conjunto de instrucciones, que puede ser ejecutado directamente por la CPU
- Para los humanos, programar en código máquina es complejo y propenso a errores
- El **lenguaje ensamblador** es un tipo de lenguaje de bajo nivel que surge como una herramienta para simplificar la programación en código máquina en **una CPU concreta**
- Esta simplificación se basa en dos aspectos fundamentales:
 - El empleo de **mnemónicos**, para representar las instrucciones
 - El empleo de **símbolos**, para representar datos y direcciones

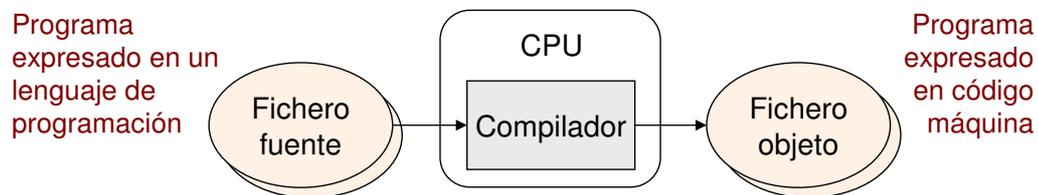
Objetivo del lenguaje ensamblador:

Liberar al programador de tener que recordar posiciones de memoria y códigos de instrucciones



5.1- Introducción al Lenguaje Ensamblador

- Un **compilador** es una herramienta software que permite traducir un programa escrito en un lenguaje de programación a código máquina



- Si el compilador traduce de **lenguaje ensamblador** a **código máquina**, se denomina **ensamblador**

5.2- Ensamblador para la CPU Teórica

5.2.1. FORMATO DEL LENGUAJE PARA LA CPU TEÓRICA

- ▶ Estructuración en sentencias
- ▶ Instrucciones
- ▶ Directivas
 - De definición de datos
 - Orientadas a dirigir el proceso de compilación
- ▶ Estructura de un programa en lenguaje ensamblador
- ▶ Constantes
- ▶ Símbolos
- ▶ Operadores
- ▶ Ejemplo

• ESTRUCTURACIÓN EN SENTENCIAS

Un *programa* se estructura en una *secuencia de sentencias*.

En lenguaje ensamblador para la CPU Teórica, cada sentencia ocupa una línea.

Cada línea se compone de cuatro campos:

[etiqueta] [operación] [operandos] [;comentario]

Se suelen colocar en columnas en el fichero fuente, separados por tabuladores

Los corchetes indican que los campos son opcionales.

→ Una sentencia puede contener los cuatro campos, alguno o **ninguno**
sentencia vacía

Dos *tipos de sentencias*, en función del campo operación:

- Instrucciones
- Directivas



• INSTRUCCIONES

Una *instrucción en ensamblador* es una sentencia que da lugar a una *instrucción máquina* tras el proceso de ensamblado o compilación.

Las instrucciones del lenguaje ensamblador para la CPU Teórica son los mnemónicos de las instrucciones máquina de dicha CPU.

Las instrucciones representan *órdenes al procesador*.

Ejemplo → **MOV R3, R5**
operandos
operación

• DIRECTIVAS

Representan *órdenes al programa ensamblador* o compilador.

Se agrupan en dos clases:

- Directivas de *definición de datos*
- Directivas orientadas a *dirigir el proceso de compilación*



• DIRECTIVAS

Directivas de definición de datos: se utilizan para definir los datos de programa.

▶ Definición de un **dato de 16 bits**

Directiva → **VALOR**

Ejemplo →

```
dato1 VALOR 0
dato2 VALOR 5B3Ah
```

operandos
operación
etiqueta

▶ Definición de un **array de datos de 16 bits**

Directiva → **VECES**

Ejemplo →

```
lista VALOR 10 VECES 0
```

nº de elementos
a definir

valor de
inicialización



• DIRECTIVAS

Directivas orientadas a dirigir el proceso de compilación

▶ Definición de una **constante de 16 bits**

Directiva → **EQU**

Ejemplo →

```
dato EQU 58A4h
```

▶ Delimitación del **cuerpo de un procedimiento**

Directivas → **PROCEDIMIENTO, FINP**

Ejemplo →

```
PROCEDIMIENTO nombre
_____
_____
_____
FINP
```

conjunto de instrucciones
del procedimiento



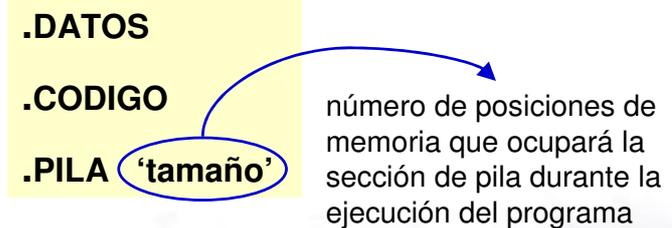
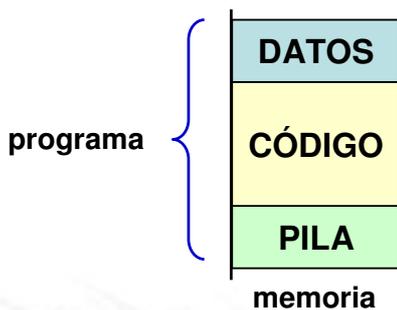
- DIRECTIVAS

Directivas orientadas a dirigir el proceso de compilación

- ▶ **Estructuración de un programa** en secciones

Un programa, en memoria, se estructura en tres secciones:

- Sección de **datos**: Contiene los **datos** del programa
- Sección de **código**: Contiene las **instrucciones** del programa
- Sección de **pila**: Contiene los **datos temporales** que se generan durante la ejecución de un programa



- DIRECTIVAS

Directivas orientadas a dirigir el proceso de compilación

- ▶ Control de **carga del programa**

Directiva → **ORIGEN** *dirección*

Dirección a partir de la cual se carga el programa en memoria.

Directiva → **INICIO** *etiqueta*

Primera instrucción del programa que la CPU ejecutará.

Ejemplo →

```

ORIGEN  10F0h
INICIO  primera
.CODIGO
primera:  _____
          _____
          FIN
    
```

- DIRECTIVAS

Directivas orientadas a dirigir el proceso de compilación

- **Finalización de la sección de código** de un programa

Directiva → **FIN**

Ejemplo → `.CODIGO`

```

_____
_____
FIN
    
```



- ESTRUCTURA DE UN PROGRAMA EN ENSAMBLADOR

Etiqueta	Operación	Operandos	Comentario
	ORIGEN	constante	; Dirección carga programa
	INICIO	etiqueta_ini	; Etiqueta de la 1ª instrucción
	.PILA	constante	; Asignación de tamaño a la pila
	.DATOS		
etiqueta1	VALOR	constante	; Datos del programa
etiqueta2	VALOR	constante	
...	
	.CODIGO		
etiqueta_ini:	mnemónico	operandos	; Instrucciones del programa
	
	
	FIN		



- CONSTANTES

Constantes Enteras

Se utilizan para representar **números enteros**

Pueden ser de tres tipos:

Tipo	Especificador
Binario	b
Decimal	(sin especificador)
Hexadecimal	h

Tienen que empezar por número:
 A3Bh → Mal
 0A3Bh → Bien

Ejemplo: Definición del mismo dato utilizando los tres tipos de constantes

.DATOS				0031
numero_1	VALOR	49	; constante decimal	0031
numero_2	VALOR	31h	; constante hexadecimal	0031
numero_3	VALOR	00110001b	; constante binaria	



- CONSTANTES

Constantes de Tipo Carácter

Se utilizan para representar caracteres.

Se expresan mediante un carácter entre comillas simples.

.DATOS			
caracter	VALOR	'a'	0061

Constantes de Tipo Cadena

Representan cadenas de caracteres.

Se expresan mediante un grupo de caracteres entre comillas dobles.

.DATOS			
palabra	VALOR	"texto"	0074
			't'
			0065
			'e'
			0078
			'x'
			0074
			't'
			006F
			'o'



- SÍMBOLOS

Las direcciones de $\left\{ \begin{array}{l} \text{datos} \\ \text{instrucciones} \end{array} \right\}$ se pueden representar mediante *etiquetas*

Las *etiquetas de datos* son símbolos

Representan las variables de los lenguajes de alto nivel de forma simbólica sobre la memoria

etiqueta \approx nombre de variable

no van seguidas de ':'

Las *etiquetas de instrucciones* son símbolos

Representan las estructuras de control de los lenguajes de alto nivel de forma simbólica sobre la memoria

etiqueta \approx destino de salto

deben ir seguidas de ':' en su definición



- SÍMBOLOS

Palabras Reservadas

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Mnemónicos de las instrucciones} \\ \text{Nombres de los registros} \\ \text{Directivas y operadores} \end{array} \right.$

Las palabras reservadas son *símbolos predefinidos*

No pueden utilizarse para definir nuevos símbolos

Símbolos predefinidos \rightarrow CASE INSENSITIVE

MOV = Mov = mov

Símbolos definidos por el usuario \rightarrow CASE SENSITIVE

Etiqueta1 \neq etiqueta1

Normalmente $\left\{ \begin{array}{l} \text{Símbolos reservados} \rightarrow \text{MAYÚSCULAS} \\ \text{Símbolos de usuario} \rightarrow \text{minúsculas} \end{array} \right.$



• OPERADORES

Realizar operaciones sobre constantes y datos durante el proceso de ensamblado (\equiv en tiempo de compilación)

▶ **DIRECCIÓN** *etiqueta*

Calcula una constante de 16 bits que representa la dirección de la instrucción o del dato al que hace referencia *etiqueta*

▶ **BYTEALTO** *cte16*

Calcula una constante de 8 bits que representa el byte más significativo de *cte16*

▶ **BYTEBAJO** *cte16*

Calcula una constante de 8 bits que representa el byte menos significativo de *cte16*



```

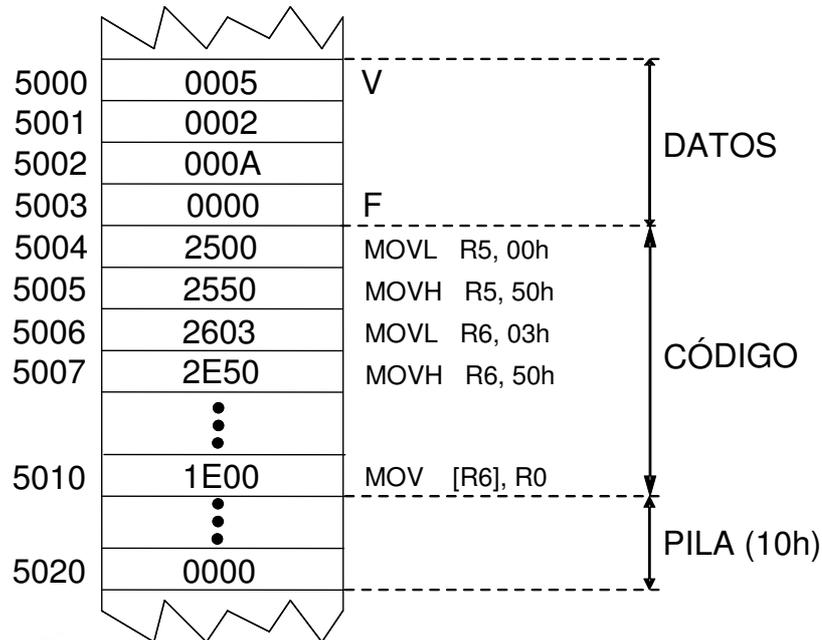
ORIGEN          5000h
INICIO          ini
.PILA           10h
.DATOS
V              VALOR          5, 2, 10
F              VALOR          0
.CODIGO
ini:           MOVL           R5, BYTEBAJO DIRECCION V
               MOVH           R5, BYTEALTO DIRECCION V
               MOVL           R6, BYTEBAJO DIRECCION F
               MOVH           R6, BYTEALTO DIRECCION F
               MOV            R0, [R5]
               ADD            R0, R0, R0
               INC            R5
               MOV            R1, [R5]
               ADD            R0, R0, R1
               INC            R5
               MOV            R1, [R5]
               SUB            R0, R0, R1
               MOV            [R6], R0
               FIN
    
```

EJEMPLO "Formula.ens"

Calcula: $F = 2 * V[0] + V[1] - V[2]$



Detalle del programa anterior, una vez ensamblado y cargado en memoria



5.2.2. CONTROL DEL FLUJO DE EJECUCIÓN

- ▶ Implementación de un condicional
- ▶ Ejemplos de condicionales
- ▶ Ejemplo de programa

5.1- Introducción al Lenguaje Ensamblador

Problema

El código puramente *secuencial* tiene una *capacidad de resolución* de problemas muy *limitada*

Solución

Utilizar *estructuras de control*

La CPU teórica proporciona *4 indicadores de estado* y su lenguaje ensamblador *2 instrucciones de salto condicional por indicador*

Indicador	Instrucciones
Z	BRZ BRNZ
C	BRC BRNC
O	BRO BRNO
S	BRS BRNS



5.2- Ensamblador para la CPU Teórica

• IMPLEMENTACIÓN DE UN CONDICIONAL

El mecanismo para realizar un condicional elemental se basa en *dos fases sucesivas*:

- 1) Comparar dos magnitudes → **COMP** RX, RY ≡ RX - RY

Resta el segundo operando del primero, igual que la instrucción SUB, modificando los bits del registro de estado pero sin almacenar el resultado de la resta

- 2) Cuando se cumple una determinada relación entre dos magnitudes, ciertos bits del registro de estado toman unos valores determinados y/o cumplen a su vez una relación entre ellos

$$RX \begin{pmatrix} = & \neq \\ > & \geq \\ < & \leq \end{pmatrix} RY$$



- IMPLEMENTACIÓN DE UN CONDICIONAL

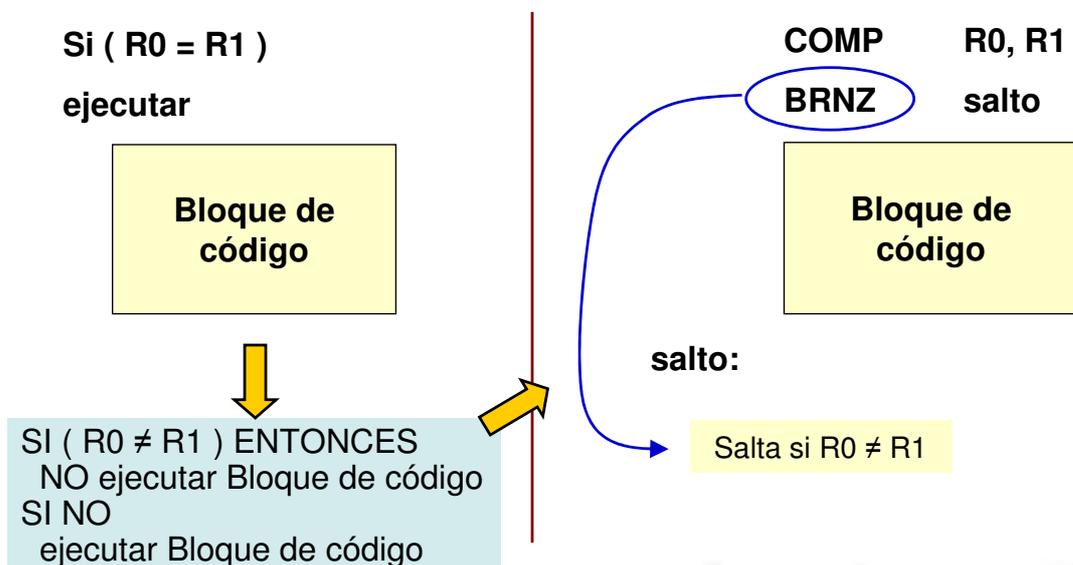
La relación a comprobar entre los bits de estado *depende* del tipo de magnitudes: *sin signo* o *con signo*.

Magnitudes sin signo	Relación	Magnitudes con signo
ZF = 1	=	ZF = 1
ZF = 0	≠	ZF = 0
CF = 0 AND ZF = 0	>	SF = OF AND ZF = 0
CF = 0	≥	SF = OF
CF = 1	<	SF ≠ OF
CF = 1 OR ZF = 1	≤	SF ≠ OF OR ZF = 1

Tras la instrucción COMP se ejecutan las instrucciones de salto condicional apropiadas según los bits de estado que sea necesario analizar → BRC, BRNC, BRO, BRNO, BRS, BRNS, BRZ, BRNZ

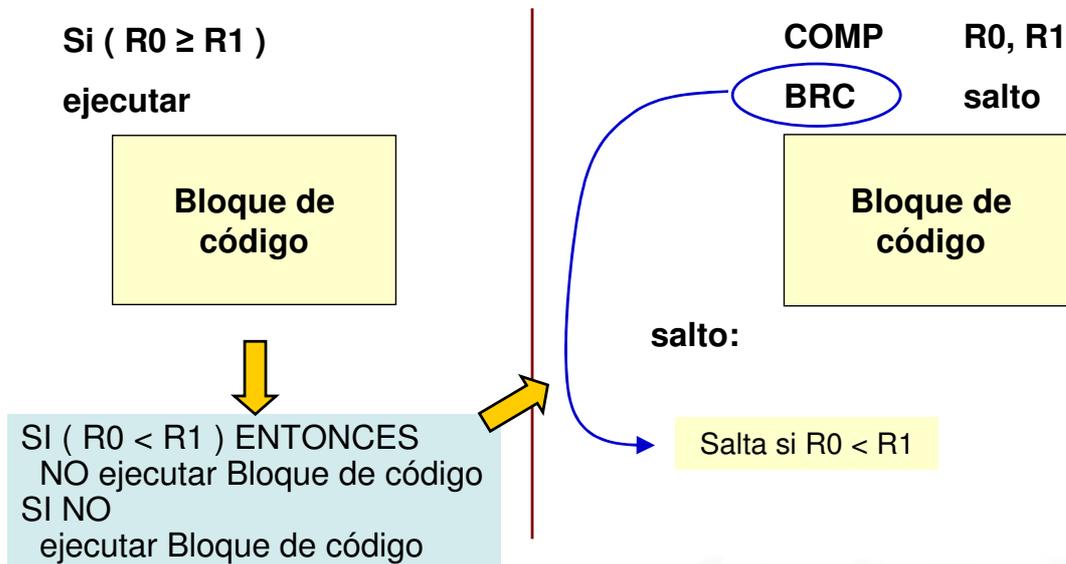
- EJEMPLOS DE CONDICIONALES

Interpretación de cantidades *sin signo*



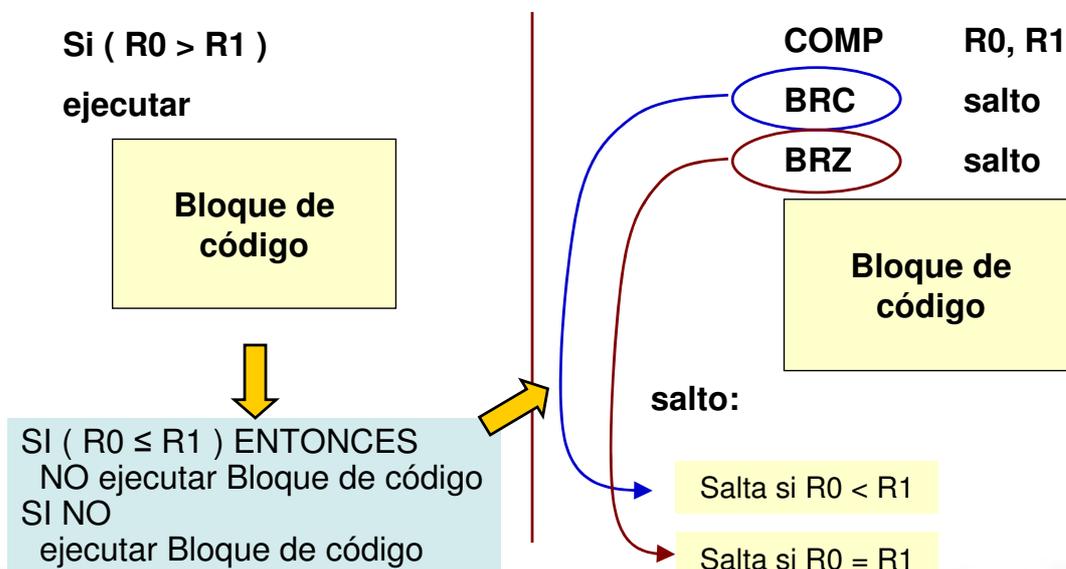
- EJEMPLOS DE CONDICIONALES

Interpretación de cantidades *sin signo*



- EJEMPLOS DE CONDICIONALES

Interpretación de cantidades *sin signo*



- EJEMPLOS DE CONDICIONALES

Interpretación de cantidades *sin signo*

Si ($R0 \leq R1$)

ejecutar

Bloque de
código



SI ($R0 > R1$) ENTONCES
NO ejecutar Bloque de código
SI NO
ejecutar Bloque de código



COMP R0, R1

BRNC compruebaZF

JMP bloque

compruebaZF:

BRNZ salto

bloque:

Bloque de
código

salto:



- EJEMPLOS DE CONDICIONALES

Interpretación de cantidades *sin signo*

Si ($R0 = R1$)

ejecutar

Bloque de
código 1

si no, ejecutar

Bloque de
código 2

COMP R0, R1

BRNZ si_no

Bloque de
código 1

JMP salto

si_no:

Bloque de
código 2

salto:



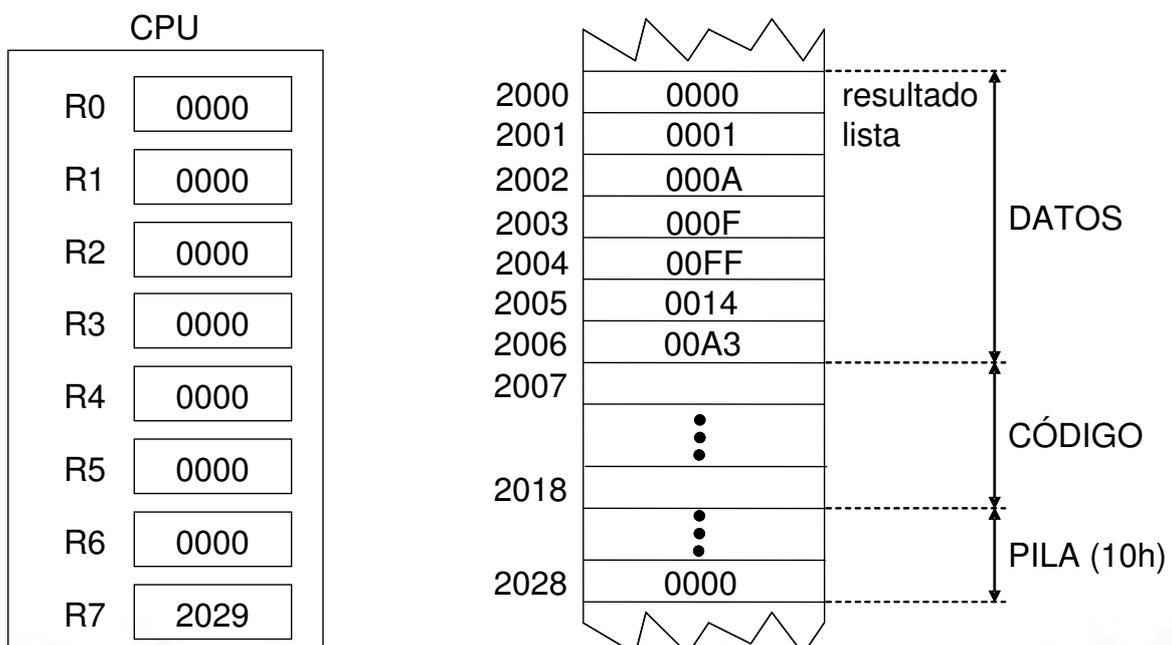
• EJEMPLO DE PROGRAMA

Escribir un programa en lenguaje ensamblador para la CPU teórica que procese una lista de 6 números (interpretados como magnitudes sin signo), sumando aquéllos que sean mayores o iguales a 10. El resultado de la suma se almacenará en una posición de la sección de datos etiquetada como resultado.

Inicio del programa en memoria → 2000h
 Tamaño de la pila → 16
 Números de la lista → 1, 10, 15, FFh, 20, A3h
 R0 → Acumulador
 R1 → Dato a procesar, temporalmente almacenado en el registro
 R2 → Contador de elementos que aún quedan por procesar
 R4 → Almacena el valor 10 (para realizar la comparación)
 R5 → Dirección de memoria donde se almacenará el resultado
 R6 → Dirección de memoria donde se encuentra el elemento de la lista que se procesa en cada momento



• EJEMPLO DE PROGRAMA



• EJEMPLO DE PROGRAMA

```

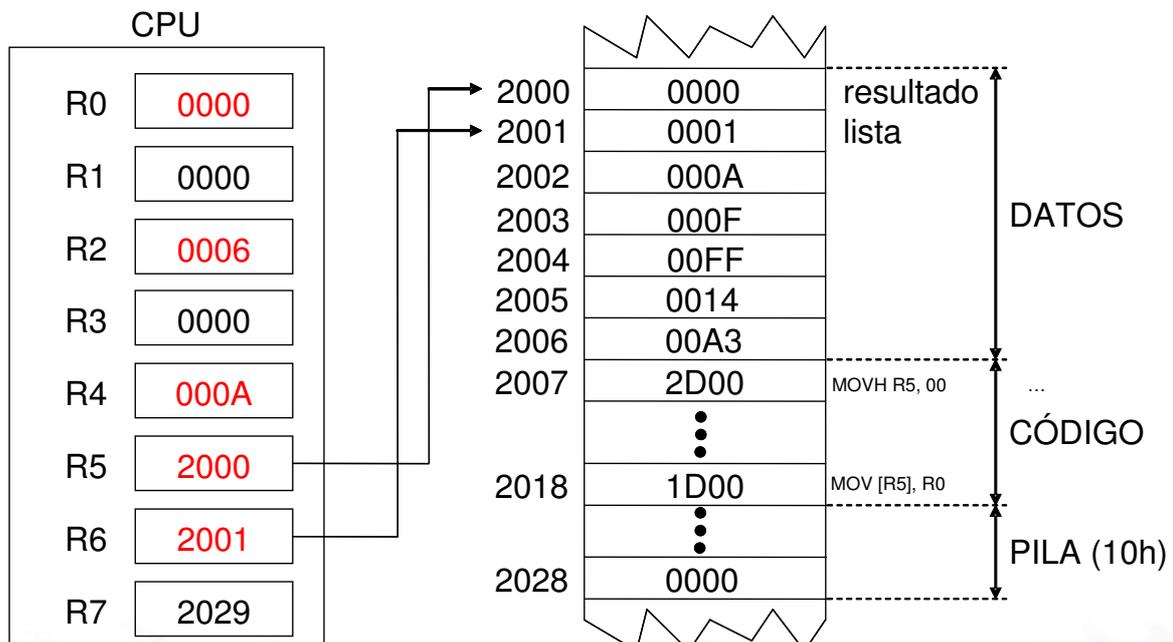
ORIGEN      2000h
INICIO     ini
.PILA      10h

.DATOS
resultado  VALOR      0
lista      VALOR      1, 10, 15, 0FFh, 20, 0A3h

.CODIGO
; inicializaciones
ini:       MOVL      R5, BYTEBAJO DIRECCION resultado
           MOVH      R5, BYTEALTO DIRECCION resultado
           MOVL      R6, BYTEBAJO DIRECCION lista
           MOVH      R6, BYTEALTO DIRECCION lista
           XOR       R0, R0, R0 ; acumulador = 0
           MOVH      R4, 00h
           MOVL      R4, 0Ah ; el 10 para comparar
           MOVH      R2, 00h ; número de elementos de
           MOVL      R2, 06h ; la lista a procesar
    
```

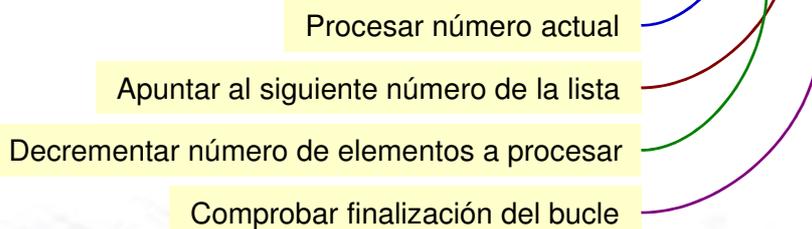


• EJEMPLO DE PROGRAMA



• EJEMPLO DE PROGRAMA

```
      ; comienzo del bucle
bucle: MOV     R1, [R6]
      COMP    R1, R4
      BRC     sigue
sigue: ADD     R0, R0, R1
      INC     R6
      DEC     R2
      BRNZ   bucle
      MOV     [R5], R0
      FIN
```

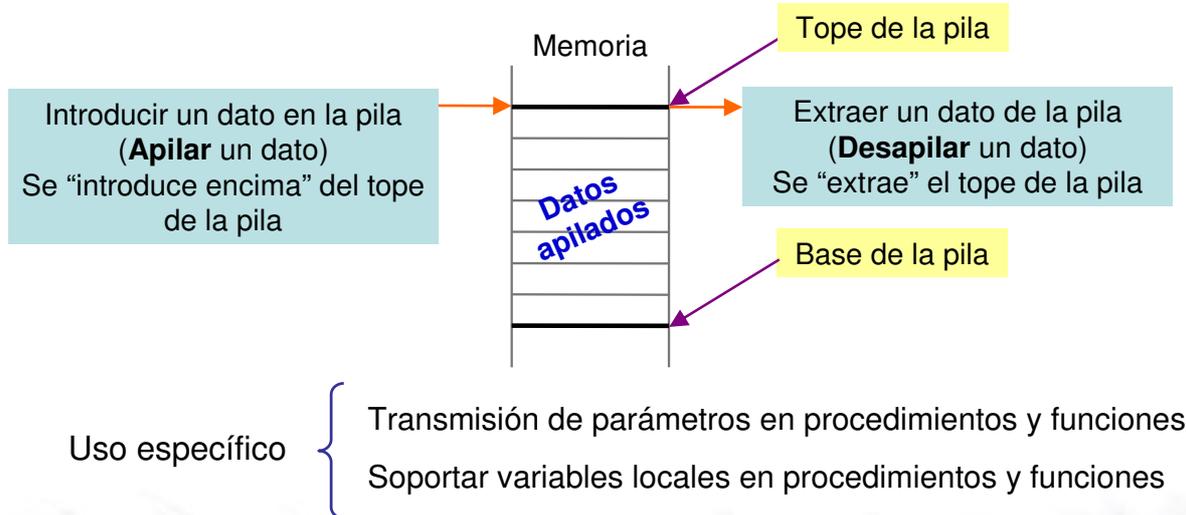


5.2.3. LA PILA

- ▶ Concepto de pila
- ▶ Implementación de la pila en la CPU Teórica
- ▶ Instrucciones de manejo de la pila
- ▶ Ejemplos de utilización de la pila

• CONCEPTO DE PILA

Zona de memoria dedicada a almacenar datos temporales que se generan durante la ejecución de un programa



• IMPLEMENTACIÓN DE LA PILA EN LA CPU TEÓRICA

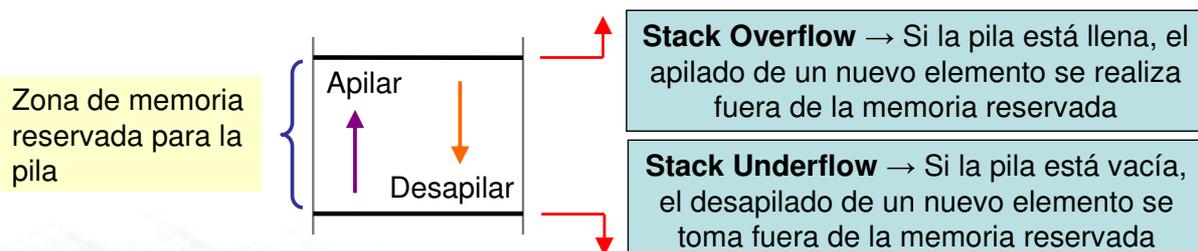
Se reserva una zona de memoria (un número concreto de palabras) para la pila utilizando la directiva **.PILA**

`.PILA 100h ; Reserva 256 posiciones de memoria para la pila`

Se utiliza un registro denominado **puntero de pila** (stack pointer o SP) que apunta siempre al último elemento apilado → al **tope de la pila**

En la CPU Teórica no hay registro SP específico

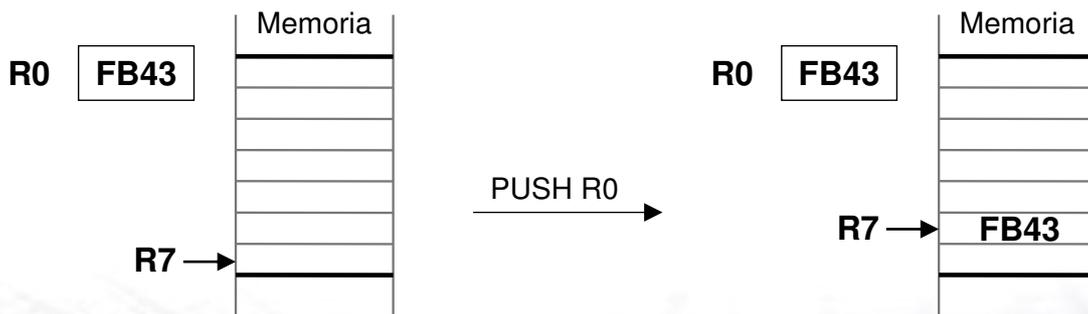
→ se utiliza como **puntero de pila** el registro **R7**



- PUSH

PASO	SEÑALES DE CONTROL
4	R7-IB, TMPE-SET, ADD, ALU-TMPS
5	Rs-IB, IB-MDR
6	TMPS-IB, IB-R7, IB-MAR, ESCRIBIR
7	FIN

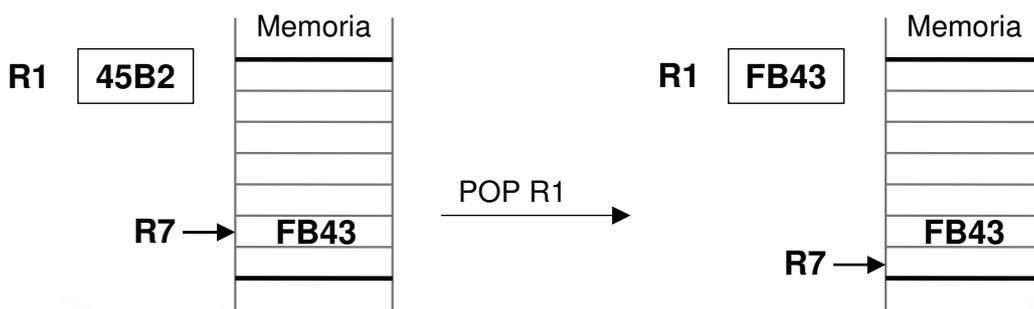
Ejemplo: PUSH R0



- POP

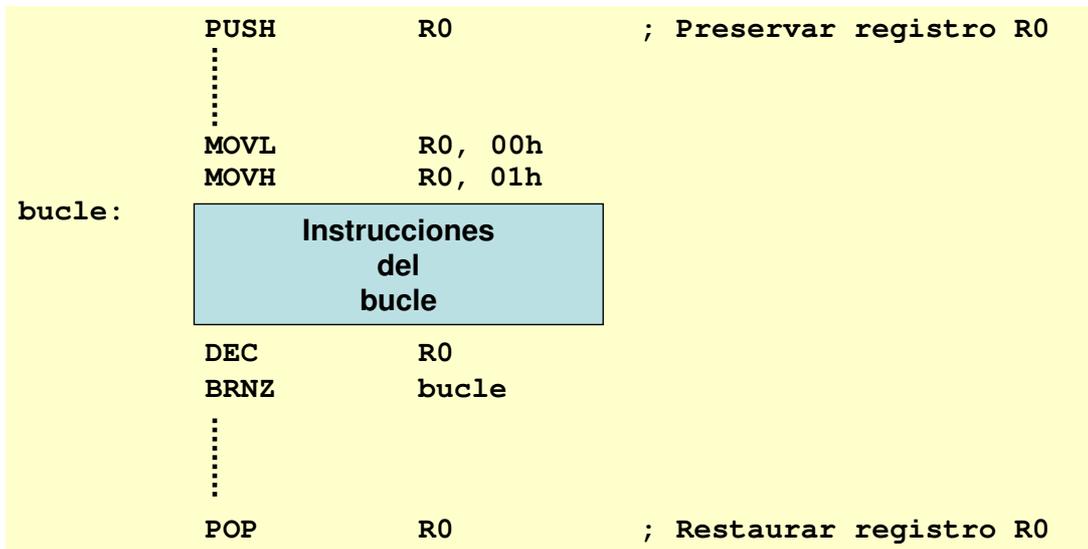
PASO	SEÑALES DE CONTROL
4	R7-IB, IB-MAR, LEER, TMPE-CLR, CarryIn, ADD, ALU-TMPS
5	TMPS-IB, IB-R7
6	MDR-IB, IB-Rd, FIN

Ejemplo: POP R1



- EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN DE LA PILA

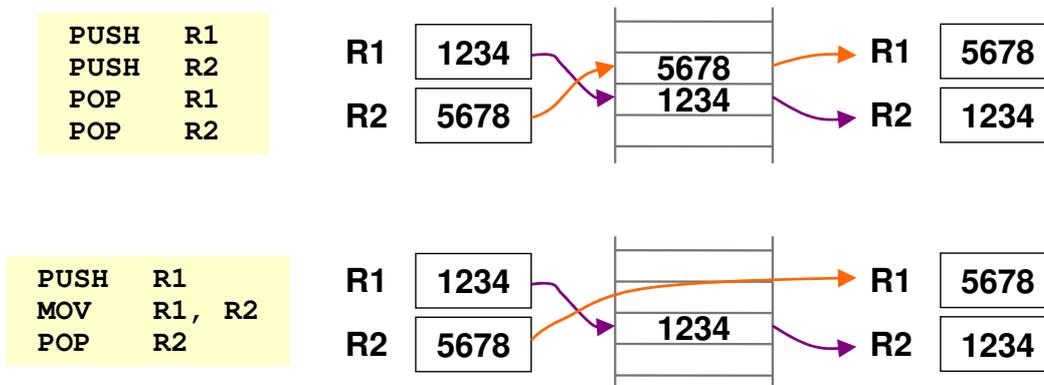
1) Almacén temporal



- EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN DE LA PILA

2) Intercambio de datos entre registros

Intercambiar el contenido de los registros R1 y R2: $R1 \leftrightarrow R2$



5.2.4. SUBRUTINAS

- ▶ Introducción
- ▶ Definición de subrutinas
- ▶ Instrucción de llamada
- ▶ Instrucción de retorno
- ▶ Ejemplo
- ▶ Transmisión de parámetros a subrutinas a través de la pila



• INTRODUCCIÓN

Subrutina ≈ Método ≈ Función ≈ Procedimiento ≈ Subprograma

Fragmento de código dentro de un programa que...

- realiza una **tarea específica**
- es **relativamente independiente** del resto del código
- puede ser llamado desde cualquier punto del programa
- está preparado para retornar, una vez ejecutado, a la instrucción siguiente a la que provocó su ejecución

Componentes de una subrutina

- ▶ **Bloque de código**, que se ejecuta cuando se invoca a la subrutina
- ▶ **Parámetros de llamada**, que recibe la subrutina desde el punto de invocación
- ▶ **Valor de retorno**, de la subrutina al punto de invocación



• INTRODUCCIÓN

Ventajas de dividir un programa en subrutinas:

- ▶ Reducción de redundancia en el programa
- ▶ Reutilización de código entre múltiples programas
- ▶ Descomponer problemas complejos en subproblemas (más fáciles de resolver, implementar y mantener)
- ▶ Incremento de la legibilidad del código

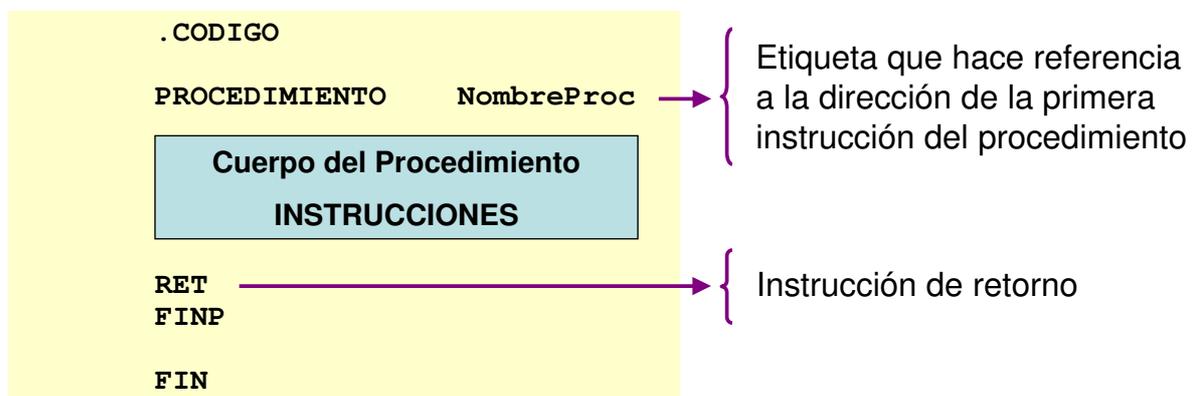
Esta forma de programación, utilizando subrutinas, se denomina **programación estructurada**



• DEFINICIÓN DE SUBROUTINAS

Para definir una subrutina dentro de un fragmento de código se utilizan las directivas **PROCEDIMIENTO** y **FINP**

Ejemplo



• INSTRUCCIÓN DE LLAMADA

Para llamar a una subrutina se dispone de **dos formas**

CALL **Etiqueta**

Dato inmediato de 8 bits
Inm8

Se basa en un **salto relativo**

$$\begin{aligned} R7 &\leftarrow R7 - 1 \\ [R7] &\leftarrow PC \\ PC &\leftarrow PC + \text{Inm8} \end{aligned}$$

CALL **RX**

RX contiene la dirección
de la primera instrucción
del procedimiento

Se basa en un **salto absoluto**

$$\begin{aligned} R7 &\leftarrow R7 - 1 \\ [R7] &\leftarrow PC \\ PC &\leftarrow RX \end{aligned}$$

La instrucción CALL funciona de forma similar a la instrucción
JMP equivalente (relativa o absoluta) con una diferencia

→ antes de saltar, almacena el valor del **PC renovado** en la **pila**



• INSTRUCCIÓN DE RETORNO

Para retornar de un procedimiento se dispone de la instrucción

RET

$$\begin{aligned} PC &\leftarrow [R7] \\ R7 &\leftarrow R7 + 1 \end{aligned}$$

El retorno a la instrucción siguiente a la que provocó el salto, se
consigue actualizando el registro PC con el valor del tope de la pila

MUY IMPORTANTE:

**En el momento de ejecutarse la instrucción RET, el
registro que actúa como puntero de pila (R7) debe
estar apuntando a la dirección de retorno almacenada
por la instrucción CALL**

En otro caso, el retorno es errático



• EJEMPLO

Escribir un programa principal capaz de **multiplicar dos números naturales**

La operación de multiplicación la debe realizar la subrutina **multiplica**

El programa principal y la subrutina se **comunican** utilizando el siguiente convenio:

- El programa principal indica los dos números a multiplicar en los registros **R4** y **R5**
- La subrutina devuelve el resultado en el registro **R0**



• EJEMPLO

```
ORIGEN          1000h
INICIO          ini
.PILA           10h
.DATOS
Multiplicador  VALOR          2
Multiplicando VALOR          3
Resultado      VALOR          0
.CODIGO
ini:           MOVL          R2, BYTEBAJO DIRECCION Multiplicador
               MOVH          R2, BYTEALTO DIRECCION Multiplicador
               MOV           R4, [R2]
               MOVL          R2, BYTEBAJO DIRECCION Multiplicando
               MOVH          R2, BYTEALTO DIRECCION Multiplicando
               MOV           R5, [R2]
               CALL          Multiplica
               MOVL          R2, BYTEBAJO DIRECCION Resultado
               MOVH          R2, BYTEALTO DIRECCION Resultado
               MOV           [R2], R0
```



- EJEMPLO

```
PROCEDIMIENTO Multiplica
XOR             R0, R0, R0 ; Inicializar R0 a 0
COMP           R4, R0    ; Comprobar si R4 es ≠ 0
BRZ            finbucle
bucle:         ADD      R0, R0, R5 ; Sumar Multiplicando
               DEC      R4        ; Hasta que
               BRNZ     bucle     ; Multiplicador sea 0
finbucle:      RET
               FINP
               FIN
```

- TRANSMISIÓN DE PARÁMETROS A SUBROUTINAS A TRAVÉS DE LA PILA

El paso de parámetros a subrutinas utilizando la pila es el mecanismo estándar utilizado en los lenguajes de programación de alto nivel

EJEMPLO

Implementar el procedimiento → **suma(lista, numele, total)**

Suma los 'numele' primeros elementos de 'lista' y almacena el resultado en 'total'

El procedimiento recibe tres parámetros:

- **lista**, por **dirección**
Dirección del primer elemento de la lista
- **numele**, por **valor**
Número de elementos a suma
- **total**, por **dirección**
Dirección donde se almacena el resultado de la suma

• EJEMPLO

	ORIGEN	1000h
	INICIO	ini
	.PILA	10h
	.DATOS	
numele	VALOR	4
lista	VALOR	1, 3, 5, 7, 9, 2, 4, 8
total	VALOR	0
	.CODIGO	
ini:	MOVL	R0, BYTEBAJO DIRECCION lista
	MOVH	R0, BYTEALTO DIRECCION lista
	PUSH	R0 ; Apilar dirección de lista
	MOVL	R0, BYTEBAJO DIRECCION numele
	MOVH	R0, BYTEALTO DIRECCION numele
	MOV	R1, [R0]
	PUSH	R1 ; Apilar número de elementos
	MOVL	R0, BYTEBAJO DIRECCION total
	MOVH	R0, BYTEALTO DIRECCION total
	PUSH	R0 ; Apilar dirección de total

Fase 1
Apilado de parámetros



• EJEMPLO

Fase 2 Llamada	→ CALL	suma
Fase 9 Limpieza de parámetros	{ INC	R7
	{ INC	R7
	{ INC	R7
Fase 3 Secuencia de entrada	{ PROCEDIMIENTO	suma
	{ PUSH	R6 ; Utilizar R6 como base de
	{ MOV	R6, R7 ; la pila
Fase 4 Preservar registros	{ PUSH	R0
	{ PUSH	R1
	{ PUSH	R2
	{ PUSH	R3
	{ PUSH	R4



EJEMPLO

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Fase 5 Acceso a parámetros</div>	}	INC	R6	
	INC	R6		
	MOV	R1, [R6]	; R1 ← Dir Total	
	INC	R6		
	MOV	R2, [R6]	; R2 ← Num Elementos	
	INC	R6		
		MOV	R3, [R6]	; R3 ← Dir Lista
bucle:				
		XOR	R0, R0, R0	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Fase 6 Cuerpo de la rutina</div>
		COMP	R2, R0	
		BRZ	finproc	
		MOV	R4, [R3]	
		ADD	R0, R0, R4	
		INC	R3	
		DEC	R2	
		BRNZ	bucle	
finproc:				
		MOV	[R1], R0	



EJEMPLO

