Modularización y Reuso: Rutinas en Q3

Organización de computadoras 2018

Universidad Nacional de Quilmes

1. Modularización y reuso

A menudo un problema complejo se transforma en algo mas abordable si se lo descompone en problemas más pequeños. Esta descomposición recibe el nombre de **modularización**.
Una rutina (o subrutina, pues en general se la utiliza como parte de un programa más grande y específico) es un programa que se espera usar mas de una vez. Muchas veces encontramos la necesidad de definir rutinas al modularizar un programa más grande (partiendo un problema complejo en problemas mas simples). Si un programa se descompone en subrutinas entonces permite pensar el problema inicial de manaera más sencilla al ser partido en sub partes y permite reusar la idea de la solución de la mismas.

El uso de rutinas requiere llevar a cabo dos tareas, el **encapsulamiento** y la **invocación**. Para lo primero es indispensable determinar el alcance de la rutina (teniendo en cuenta que debe ser acotada). Una vez hecho esto se crea el código que cumpla con la función de la rutina y se delimita su comienzo y su fin, para lo cual se utiliza una etiqueta que la identifique unequivocamente, ubicada en la primera instrucción (para que la rutina pueda ser invocada por su nombre), y una instrucción especial `RET` al final (para que al finalizar su ejecución, vuelva al programa que la invocó). Cabe destacar que no necesariamente la instrucción `RET` estará sólo al final de la rutina, también puede encontrarse en el cuerpo de la misma.

Considerar como ejemplo la siguiente rutina `agregar`, que incrementa en uno el valor de R0.

```
agregar: ADD R0, 0x0001
         RET
```

La rutina esta delimitada a su inicio por la etiqueta `agregar` por lo cual para su llamado o invocación se utiliza la instrucción especial `CALL` haciendo referencia a la misma en el contexto de un *programa principal o programa cliente*.
Siguiendo el ejemplo anterior, la siguiente es una invocación a la rutina `agregar`.

```
CALL agregar
```

La etiqueta `agregar` se traducirá en un `inmediato` cuyo valor será la dirección de memoria a partir de la cual esta ensamblada la rutina, por lo cual la primer instrucción de la misma será la siguiente a ejecutar.
Si la rutina `agregar` se encuentra ensamblada a partir de la celda de memoria `0x568A` la invocación anterior equivale a la siguiente:

```
CALL 0x568A
```

Por otro lado, si se utilizara esta rutina para incrementar en 3 en vez de en uno el valor de R0, es posible utilizarla varias veces, provocando el **reuso de la subrutina**. En ese caso se modifica el programa principal que la invoca. Por ejemplo:

```
CALL agregar
CALL agregar
CALL agregar
```

1.1. Haciendo rutinas flexibles: pasaje de parámetros

Considerar la siguiente rutina `avg` (*average* = promedio), que calcula el promedio entre los valores 20 (0x0014 en hexadecimal) y 30 (0x001E en hexadecimal):

```
avg: MOV R0, 0x0014
     ADD R0, 0x001E
     DIV R0, 0x0002
     RET
```

El programa cliente que utilice esta rutina podría ser como sigue:

```
CALL avg
```

En este ejemplo se ve claramente una posible mejora para hacer: que la rutina pueda calcular el promedio entre *cualquier par de valores*. Para lograr esto la rutina debe ser **parametrizable** ya que no conocemos los valores involucrados. Haciendo una analogía con las matemáticas, lo que se intenta hacer es pasar de una expresión

$$avg = \frac{20 + 30}{2}$$

a esta otra:

$$avg = \frac{a + b}{2}$$

siendo a y b dos variables.

A diferencia de otros lenguajes de programación, Q3 no cuenta con una sintaxis específica para el *pasaje de parámetros a las rutinas*. Pero es posible que la rutina se alimente de esos valores de entrada para el cálculo del promedio, a través del uso de variables, que en esta arquitectura serían registros o celdas de la memoria principal.

Con esta idea, la rutina puede mejorarse de la siguiente manera:

```
avg: MOV R0, R1
     ADD R0, R2
     DIV R0, 0x0002
     RET
```

De esta manera la rutina `avg` ahora calcula el promedio entre dos valores cualesquiera que esten almacenados en `R1` y `R2`. Es importante notar que por esta razón el programa que la usa debe modificarse también para colocar los valores para los cuales queremos calcular el promedio en `R1` y `R2`:

```
MOV R1, 0x0014
MOV R2, 0x001E
CALL avg
```

1.2. Documentación de las rutinas

Para usar apropiadamente cualquier rutina es importante contar con información sobre qué hace, cómo pasarle los datos que necesita (parámetros), qué modifica del estado (registros, celdas de memoria, etc) y de qué manera dispone el o los resultados. Esa información se conoce con el nombre de **documentación de la rutina** y tiene tres piezas de información:

- **Requiere**: Se utiliza para describir los parámetros de entrada. Dónde se espera (qué registro o celda contiene cada uno) y que naturaleza tienen.
- **Retorna**: Se utiliza para indicar en qué variable (registro o celda) se retorna el/los resultado/s y en que consiste el mismo.
- **Modifica**: Se utiliza para describir qué variables se modifican, previniendo posibles efectos colaterales de la ejecución de la rutina.

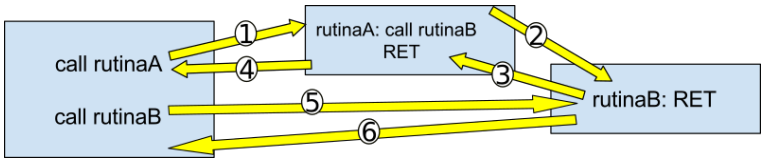
Por ejemplo, la documentación que acompañe la runa `avg` mencionada arriba podría ser:

```
# ------------------------------Rutina avg
# Requiere: dos valores a promediar en los
% * <federicoemartinez@gmail.com> 2018-03-03T11:44:53.317Z:
%
% > Requiere: dos valores a promediar en los
% > #           registros R1 y R2
% y que la suma entre en 16 bits?
%
% ^ <tatianamolinari90@gmail.com> 2018-03-12T12:49:08.868Z.
#           registros R1 y R2  y que la suma de ambos se pueda representar en 16 bits
# Modifica: R0
# Retorna: en R0 el promedio (entero)
#          entre R1 y R2
```

La documentación de una rutina es un contrato entre el autor de la rutina y los usuarios de la misma ¿Qué quiere decir esto? Que el programador realiza la rutina y su documentación comprometiendosé a que si las especificaciones escritas en la documentación son respetadas a la hora de ser invocada (si se respeta el requiere) la rutina funcionara de manera correcta con los resultados esperados (respetando el modifica y el retorna).
Esto lo que nos permite es que, cualquier programador pueda utilizar una rutina sólo conociendo su nombre (etiqueta) y su documentación y no necesita saber como esta implementada.

2. Cómo funcionan CALL y RET

El objetivo de la programación mediante rutinas es el de abstraer al programador de la ubicación de dichas rutinas en memoria principal, a través del encapsulamiento. Esta idea se describe gráficamente en el ejemplo de la siguiente figura:



En ese ejemplo se ve que al finalizar las ejecuciones de la rutina `rutinaB` se debe retornar a dos lugares distintos y dependaran de la ubicación de la instrucción `CALL` que lo llamó: en una oportunidad la rutina `rutinaB` es invocada desde la rutina `rutinaA` y en la otra desde el programa principal por lo que vemos que el punto de retorno varía.

Es importante destacar que el ensablador cuando carga el código maquina del programa y las rutinas en memoria no necesariamente lo hace en ubicaciones contínuas de memoria. Por ejemplo:

	...
(programa ppal)0x9999	<call>
0x999A	<rutinaA>
0x999B	<call>
0x999C	<rutinaB>
	⋮
(rutina A)AAAA	<call>
0xAAAB	<rutinaB>
0xAAAC	<ret>
	⋮
(rutina B)0xBAA0	<ret>
	...

Para llevar control de cuál es la instrucción que se debe ejecutar, se utiliza el registro *PC*. Este registro se incrementa al finalizar la etapa de *búsqueda de instrucción* para saber en que celda de memoria esta la siguiente instrucción a ejecutar.
A diferencia de las instrucciones aritméticas, en las que el PC no se modifica hasta que comience un nuevo ciclo, la instrucción `CALL` requiere alterar el valor de PC para poder causar el efecto desviación de flujo necesario. Veamos cómo debería ser la ejecución del programa del ejemplo:

1. `PC=9999`
2. Se busca la instrucción `CALL rutinaA`. Por lo cual el nuevo valor de `PC` es 0x999B, ya debe quedar preparado para ejecutar la siguiente instrucción del programa principal.
3. Se realiza la ejecución de `CALL rutinaA`, que principalmente preparar PC para que se desvío el flujo a la rutina `rutinaA`, por lo cual su nuevo valor es `0xAAAA`. Pero además se debe **recordar el valor anterior de PC** (0x999B) para restituir el flujo al retornar de la rutina.
4. Se busca la instrucción `CALL rutinaB` (ensamblada en la dirección de memoria 0xAAAA). Entonces el valor de pc es ahora `0xAAAC`, pues debe quedar preparado para la siguiente instrucción.

5. Se realiza la ejecución de `CALL rutinaB`, entonces `PC=BAA0`. Nuevamente se debe **recordar el valor de PC** (AAAC).

6. Se busca la instrucción `RET` (ensamblada en `BAA0`). Entonces `PC=BAA1`, pues debe quedar preparado para la siguiente instrucción.

7. Se realiza la ejecución de `RET`, es decir **se restituye el último valor de PC**: `PC=AAAC`

8. Se busca la instrucción `RET` (ensamblada en `AAAC`). Entonces `PC=AAAD`, pues debe quedar preparado para la siguiente instrucción.

9. Se realiza la ejecución de `RET`, es decir **se restituye el anterior valor de PC**: `PC=999B`

10. Se busca la instrucción `CALL rutinaB` (ensamblada en `999B`). Entonces `PC=999D`, pues debe quedar preparado para la siguiente instrucción.

11. Se realiza la ejecución de `CALL rutinaB`, entonces `PC=BAA0`

12. Se busca la instrucción `RET` (ensamblada en `BAA0`). Entonces `PC=BAA1`, pues debe quedar preparado para la siguiente instrucción.

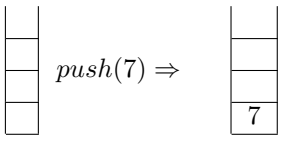
13. Se realiza la ejecución de `RET`, es decir **se restituye el último valor de PC**: `PC=999D`

El desafío entonces es darle a la UC (Unidad de Control) una herramienta que permita llevar cuenta de los valores de PC acumulados para ir restituyendolos en orden inverso. La solución no puede ser tener un registro de respaldo del PC porque como vemos en los pasos 3 y 5, se necesitan mantener dos valores (y podrían ser aún más).

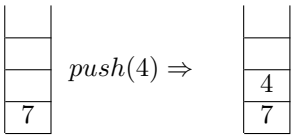
2.1. La estructura de pila

Los cambios en el PC producidos por la ejecución de CALL dan lugar a la necesidad de contar con una estructura de datos que permita registrar los diferentes valores de retorno y en el orden necesario, para ser consumidos de manera inversa a la que fueron registrados. Esta estructura se denomina **pila** y está caracterizada por dos operaciones: apilado (*push*) y desapilado (*pop*).

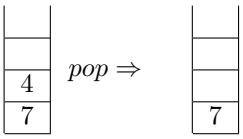
Suponer una estructura de pila vacía, donde se apila el valor 7:



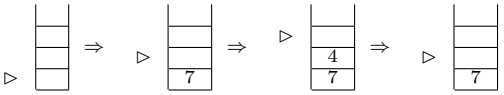
Si luego se apila el valor 4:



Si a continuación se desapila:



Este concepto abstracto de pila se puede implementar mediante la memoria principal, en combinación con un registro que indique el **tope de pila** (indicado en el dibujo con un ▷



El mencionado registro se denomina **SP** (*Stack pointer*, puntero de pila), y su valor cuando la pila está vacía es `FFEF`. Con esta idea, se debe revisar el funcionamiento esperado para el `CALL` y el `RET`. Para facilitarlo, veamos los cambios esperados en la pila según el ejemplo de ejecución de la sección anterior:

Es decir que con cada `CALL` se debe **apilar** y con cada `RET` se debe **desapilar**.

CALL Se apila el PC anterior y luego se lo reemplaza por la dirección de inicio de la rutina:

1. Se copia PC a la celda indicada por **SP**
2. Se decrementa (hay un elemento más en la pila) **SP**
3. Se actualiza PC

RET Se desapila el último PC anterior:

1. Se incrementa (hay un elemento menos en la pila)**SP**
2. Se copia a PC el valor de celda indicada por **SP**

3. Simulación de un programa

Durante la ejecución de un programa además de los cambios en los registros y las celdas de memoria se realizan cambios en los registros especiales PC, SP y en la pila que dependerán de las instrucciones que lo conformen. Para seguir paso a paso estos cambios se completará la siguiente tabla simulando ejecución instrucción por instrucción:

PC	Instruccion	PC-BI	PC-Ex	SP	Pila

Donde:

- **PC-BI** es el valor de PC luego de la *busqueda de instrucción*
- **PC-Ex** es el valor de PC luego de la *ejecución*.

- **SP** es el valor del registro SP luego de la *ejecución*

- **Pila** es la secuencia de valores apilados (en orden invertido con respecto a su inserción en la pila)

Por ejemplo, suponer la ejecución del siguiente programa llamado **principal**:

```
rutinaB: RET
rutinaA: CALL rutinaB
         RET
principal: CALL rutinaA
           CALL rutinaB
```

Y se tienen los siguientes datos:

- El programa **principal** esta ensamblado a partir de la celda 0x9999
- La rutina **rutinaA** esta ensamblada a partir de la celda AAAA
- La rutina **rutinaB** esta ensamblada a partir de la celda BAA0
- La pila está vacía.

La primer entrada de la tabla se completa como sigue:

PC es el valor inicial de PC, en este caso: `9999`

PC	Instruccion	PC-BI	PC-Ex	SP	Pila
9999					

Instrucción es el código fuente de la instrucción leida. En este caso: `CALL rutinaA`

PC	Instruccion	PC-BI	PC-Ex	SP	Pila
9999	CALL rutinaA				

PC-BI Inmediatamente después de la búsqueda de instrucción, el PC contiene la dirección de memoria donde comienza la siguiente instrucción a ejecutar. Siendo la instrucción `CALL rutinaA` y sabiendo que ocupa dos celdas, sumamos esa cantidad a `0x9999`. Entonces el valor del registro PC luego de la búsqueda de instrucción es `0x999B`.

PC	Instruccion	PC-BI	PC-Ex	SP	Pila
9999	CALL rutinaA	999B			

Ejecución Como indica el **efecto de la instrucción CALL**, es decir: `[SP]<- PC; SP<-SP-1; PC<-Origen`, se llevan a cabo 3 pasos:

1. Apilar PC: La pila debe almacenar el valor de retorno para PC

PC	Instruccion	PC-BI	Pila	SP	PC-Ex
			[SP]<- PC	SP<-SP-1	PC<-Origen
9999	CALL rutinaA	999B	{999B}		

2. Decrementar SP: El valor del registro SP se actualiza para que se apunte a un lugar libre, es decir que toma el valor `FFEE`.

PC	Instruccion	PC-BI	Pila	SP	PC-Ex
			[SP]<- PC	SP<-SP-1	PC<-Origen
9999	CALL rutinaA	999B	{999B}	FFEE	

3. Actualizar PC: Finalmente, valor de PC luego de la ejecución se carga con el valor `Origen`, y como se trata de una etiqueta (valor inmediato), dicho valor se leyó con el código máquina de la instrucción.

PC	Instruccion	PC-BI	Pila	SP	PC-Ex
			[SP]<- PC	SP<-SP-1	PC<-Origen
9999	CALL rutinaA	999B	{999B}	FFEE	AAAA

Es importante notar que las columnas **PC-Ex**, **SP** y **pila** se modifican sólo en los casos de instrucciones como `CALL` y `RET` que son, hasta ahora, las que modifican PC y la pila.

Para continuar la simulación se repite el proceso proceso descripto con las siguientes instrucciones, en el orden del **flujo de ejecución**, incluyendo el llamado a subrutinas (y las instrucciones de las mismas) hasta la última instrucción del programa principal inclusive. La tabla terminada con la simulación de ejecución del programa anterior sería la siguiente:

PC	Instruccion	PC-BI	Pila	SP	PC-Ex
9999	CALL rutinaA	999B	{999B}	FFEE	AAAA
AAAA	CALL rutinaB	AAAC	{AAAC,999B}	FFED	BAA0
BAA0	RET	BAA1	{999B}	FFEE	AAAC
AAAC	RET	AAAD	{}	FFEF	999B
999B	CALL rutinaB	999D	{999D}	FFEE	BAA0
BAA0	RET	BAA1	{}	FFEF	999D