Generación de código para funciones

Ejemplo introductorio: escritura de funciones en NASM

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- En estas transparencias pondremos una subrutina ASPLE y la generación de código equivalente

```
function int cero()
begin
        return 0
end
```

```
_cero:
        push ebp
        mov ebp, esp
        sub esp, 0

        push dword 0
        pop eax

        mov esp, ebp
        pop ebp
        ret
```


Generación de código para funciones

Ejemplo introductorio: escritura de funciones en NASM

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- En estas transparencias pondremos una subrutina ASPLE y la generación de código equivalente

```
begin
        .
        .
        .
        ... cero();
        .
        .
        .
end
```

```
        .
        .
        .
main:
        .
        .
        .
        call _cero
        add esp, 0
        .
        .
        .
ret
```


Generación de código para funciones

Condiciones para subrutinas recursivas y reentrantes

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Una subrutina **reentrante** [deMiguel01] es aquélla que puede ser llamada dessde varios puntos simultáneamente sin modificar su comportamiento
- Una subrutina **recursiva** es aquélla que puede llamarse a sí misma, por lo tanto, una subrutina recursiva necesariamente tiene que ser reentrante. Las condiciones para que una subrutina sea recursiva y reentrante son las mismas.
- Las condiciones necesarias para que una subrutina sea recursiva y reentrante tiene que ver con que los datos utilizados por ellas no estén contenidos en posiciones fijas de memoria. Por lo tanto **es suficiente con utilizar la pila** para almacenar **datos globales, locales y parámetros.**

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: conceptos preliminares

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Para llamar a una subrutina se cumple los que se conoce como “convenio de llamadas” que debe ser especificado explícitamente al diseñar el compilador.
- El convenio de llamadas tiene que dar respuesta a las siguientes preguntas:
  - ¿Cómo se comunican los argumentos desde el programa llamante a la función llamada?
  - ¿Cómo se comunican los resultados desde la función llamada hasta el programa llamante?
- Se recomienda utilizar el siguiente convenio de llamadas:
  - Para comunicar los argumentos desde el programa llamante a la función llamada:
    - Se utilizará la pila
    - El programa llamante dejará en la pila los argumentos de la llamada **en el mismo orden** en el que serán utilizados
    - Si la función está codificada correctamente, tras terminar su ejecución, dejará la pila en el mismo estado en el que la encontró
    - Tras la llamada, el programa llamante tiene la responsabilidad de eliminar de la pila
  - Para comunicar los resultados desde la función llamada:
    - Se utilizará el registro extendido `eax`.

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Explicando más detalladamente el proceso consideremos el siguiente programa ASPLE

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```


Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Imaginemos el código NASM equivalente. Comencemos por el programa principal

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```


Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Imaginemos el código NASM equivalente. Comencemos por el programa principal

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
segment .data
 _z dd 0
segment .text
 global main
 extern lee_entero,
imprime_entero

main:
```


Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Imaginemos el código NASM equivalente. Comencemos por el programa principal

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
```

El programa llamante introduce en la pila los argumentos

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Imaginemos el código NASM equivalente. Comencemos por el programa principal

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
```

Realiza la llamada a la función

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Imaginemos el código NASM equivalente. Comencemos por el programa principal

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4
```

Y "limpia" la pila. Esta instrucción es equivalente a `pop <registro>` pero no necesita modificar ningún registro

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Imaginemos el código NASM equivalente. Comencemos por el programa principal

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4


 push dword [_z]
 call _doble
 add esp, 4
```

De la misma manera hay que hacer con una llamada a una función definida por el programador

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Imaginemos el código NASM equivalente. Comencemos por el programa principal

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4


 push dword [_z]
 call _doble
 add esp, 4

 push dword eax
```

El retorno de la función se encuentra en `eax`

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Imaginemos el código NASM equivalente. Comencemos por el programa principal

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4



 push dword [_z]
 call _doble
 add esp, 4

 push dword eax
 call imprime_entero
 add esp, 4
```


Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Imaginemos el código NASM equivalente. Comencemos por el programa principal

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4



 push dword [_z]
 call _doble
 add esp, 4

 push dword eax
 call imprime_entero
 add esp, 4
 ret
```


Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Para comprender el código que hay que generar para la función imaginemos cómo está la pila (donde se tiene que almacenar toda la información) en una llamada si z contiene el valor 3

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4



 push dword [_z]
 call _doble
 add esp, 4

 push dword eax
 call imprime_entero
 add esp, 4
 ret
```


Generación de código para funciones

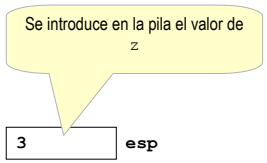
Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Recuérdese que la pila de 32 bits tiene su puntero almacenado en el registro `esp` recuerde, también, que la pila "crece" hacia posiciones de memoria de valor menor, se representará gráficamente con crecimiento "hacia abajo"

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4



 push dword [_z]
 call _doble
 add esp, 4

 push dword eax
 call imprime_entero
 add esp, 4
 ret
```



Generación de código para funciones

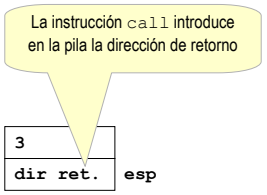
Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Recuérdese que la pila de 32 bits tiene su puntero almacenado en el registro `esp` recuerde, también, que la pila "crece" hacia posiciones de memoria de valor menor, se representará gráficamente con crecimiento "hacia abajo"

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4



 push dword [_z]
 call _doble
 add esp, 4

 push dword eax
 call imprime_entero
 add esp, 4
 ret
```



Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Esta es la pila que se encuentra la función cuando comienza su ejecución
- Está claro dónde se encuentra el argumento de la función (`arg`)
- Se tiene que utilizar también la pila para localizar las variables locales (`auxArg`)
- Debemos conocer qué expresión, en función de los registros de gestión de la pila, sirve para localizar en ella argumentos y variables locales.
- Obsérvese que el compilador tendrá que generar el código necesario para el cuerpo de la función.
- Por las decisiones de diseño tomadas, se utilizará la pila, por lo tanto, el valor del registro `esp` cambiará.
- NASM proporciona otro registro `ebp` específicamente para poder solucionar esta circunstancia.
- Para ello hay que hacer lo siguiente:
  - Guardar el valor de `ebp` (también en la pila)
  - Utilizar `ebp` para mantener una copia del valor de `esp` en el momento de la entrada
  - Utilizar `ebp` para localizar los parámetros y las variables locales
  - Recuperar los valores de los dos registros antes de salir de la función

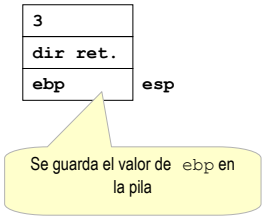
Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
```



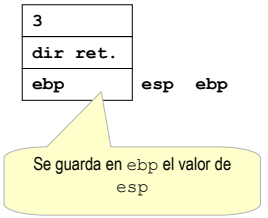
Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
 mov ebp, esp
```



Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Recuérdese que usamos un tamaño de dato de 32 bits, que son 4 bytes. Así es fácil saber que `arg` se encuentra separado de ebp por 2 dword, es decir + 8 bytes

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
 mov ebp, esp
```

3	ebp+8
dir ret.	
ebp	esp ebp

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Ahora sólo queda localizar (reservar espacio en la pila y saber como acceder posteriormente) las variables locales (`auxArg`). Para ello se utiliza las posiciones libres bajo la cima de la pila (como con `push`, restamos a `esp` lo necesario)

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
 mov ebp, esp
 sub esp, 4
```

3	ebp+8
dir ret.	
ebp	ebp
	esp

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Por lo tanto, `auxArg` se encontrará siempre 4 bytes por debajo de `ebp` es decir, en `ebp-4`

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
 mov ebp, esp
 sub esp, 4
```

3	ebp+8
dir ret.	
ebp	ebp
	esp ebp-4

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Ahora se puede generar el código para el cuerpo de la función (aquí se genera “a mano” y seguro que diferirá de lo generado por el compilador)

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
 mov ebp, esp
 sub esp, 4


 mov dword eax, [ebp+8]
 mov dword [ebp-4], eax
```

3	ebp+8
dir ret.	
ebp	ebp
3	esp ebp-4

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Ahora se puede generar el código para el cuerpo de la función (aquí se genera "a mano" y seguro que diferirá de lo generado por el compilador)

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
 mov ebp, esp
 sub esp, 4


 mov dword eax, [ebp+8]
 mov dword [ebp-4], eax
 mov dword edx, 2
 mul edx
```

3	ebp+8
dir ret.	
ebp	ebp
3	esp ebp-4

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Antes de salir de la función se debe "recuperar" los valores iniciales de `ebp` y `esp`.

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
 mov ebp, esp
 sub esp, 4


 mov dword eax, [ebp+8]
 mov dword [ebp-4], eax
 mov dword edx, 2
 mul edx

 mov esp, ebp
```

3	ebp+8
dir ret.	
ebp	ebp esp
3	ebp-4

Se copia en `esp` su valor que está guardado en `ebp`. Obsérvese que es como si se hicieran los `pop` necesarios para eliminar las variables locales

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Antes de salir de la función se debe "recuperar" los valores iniciales de `ebp` y `esp`.

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
 mov ebp, esp
 sub esp, 4


 mov dword eax, [ebp+8]
 mov dword [ebp-4], eax
 mov dword edx, 2
 mul edx

 mov esp, ebp
 pop ebp
```

3	ebp+8
dir ret.	esp
ebp	ebp
3	ebp-4

Se recupera (desde la pila) el antiguo valor de `ebp`. Obsérvese que, tras modificar en la instrucción anterior `esp` la cima de la pila apunta ahora a la posición que guarda la copia de `ebp`

Generación de código para funciones

Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Antes de salir de la función se debe "recuperar" los valores iniciales de `ebp` y `esp`.

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
_doble:
 push ebp
 mov ebp, esp
 sub esp, 4


 mov dword eax, [ebp+8]
 mov dword [ebp-4], eax
 mov dword edx, 2
 mul edx

 mov esp, ebp
 pop ebp
 ret
```

3	esp
dir ret.	

Y ya se puede devolver el control al programa llamante mediante la instrucción `ret`. Esta instrucción elimina de la pila la dirección de retorno

Generación de código para funciones

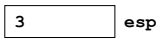
Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Retornamos, por lo tanto, al código del programa principal que se encuentra la pila como la tenía antes de la ejecución de la instrucción `call`. Obsérvese que la pila todavía contiene los argumentos de la función, el programa debe "limpiar" la pila.

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4



 push dword [_z]
 call _doble
 add esp, 4

 push dword eax
 call imprime_entero
 add esp, 4
 ret
```



Generación de código para funciones

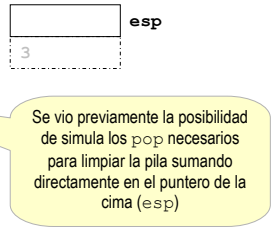
Llamada a subrutinas: ejemplo preliminar

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Retornamos, por lo tanto, al código del programa principal que se encuentra la pila como la tenía antes de la ejecución de la instrucción `call`. Obsérvese que la pila todavía contiene los argumentos de la función, el programa debe "limpiar" la pila.

```
begin
 int z;

 function int doble(int arg)
 begin
   int auxArg;

   auxArg := arg;
   return 2*arg
 end

 input z;
 output doble(z)
end
```

```
...
main:
 push dword _z
 call lee_entero
 add esp, 4



 push dword [_z]
 call _doble
 add esp, 4

 push dword eax
 call imprime_entero
 add esp, 4
 ret
```



Generación de código para funciones

Código para la llamada a funciones

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Lo observado en el ejemplo anterior puede generalizarse para cualquier función con cualquier número de variables locales y cualquier número de argumentos:
- El programa llamante debe primero **copiar los argumentos de la función en la pila en el mismo orden en el que aparecen en la declaración de la función**

```
push dword <1er argumento>
    ...
push dword <último argumento>
```

- Debe, luego **llamar a la función**:

```
call _<nombre función>
```

- Y **limpiar la pila**:

```
add esp, <4 * nº argumentos de la función>
```

- Antes de continuar con su código sabiendo que **`eax` contiene el retorno de la función** (el código escrito a continuación imprime el entero devuelto por la función llamada)

```
push eax
call imprime_entero
add esp, 4
```


Generación de código para funciones

Código inicial y final para funciones recursivas y reentrantes

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Lo observado en el ejemplo anterior puede generalizarse para cualquier función con cualquier número de variables locales y cualquier número de argumentos:
- Las **primeras sentencias NASM del cuerpo de cualquier función** deben ser las siguientes:

```
_<nombre_funcion>:
        push ebp
        mov ebp, esp
        sub esp, <4*nº var locales>
```

- Y **las últimas** deben ser las siguientes:

```
        mov esp, ebp
        pop ebp
        ret
```

Generación de código para funciones

Localización de contenido de parámetros

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Y, en **el código del cuerpo de la función**, cuando se quiera acceder al valor de los parámetros se utilizará la expresión

```
[ebp + <4 + 4*posición del parámetro en declaración>]
```

- Recuerde que, el primer 4 es para "saltar" la dirección de retorno.
- Por ejemplo:
  - El valor del último argumento será `[ebp+8]`.
  - El valor del penúltimo argumento será `[ebp+12]`.
  - ...
  - El valor del i-esimo argumento será `[ebp+`<4+4*(num-argumentos-i)>`]`, contando i con origen 0.

Generación de código para funciones

Localización de contenido de variables locales

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Y, en **el código del cuerpo de la función**, cuando se quiera acceder al valor de las variables locales se utilizará la expresión

```
[ebp - <4*posición de la variable en declaración>]
```

- Por ejemplo:
  - El valor de la primera variable local será `[ebp-4]`.
  - El valor de la segunda variable local será `[ebp-8]`.
  - ...
  - El valor de la i-esima variable local será `[ebp-`<4*i>`]`.

Generación de código para funciones

Localización de dirección de parámetros y variables locales

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Sin embargo, como se ha indicado en la generación de código de otras construcciones de ASPLE (por ejemplo en el de las expresiones que contienen identificadores), a veces es necesario utilizar "la dirección" y no "el contenido"
- Recuérdese, por ejemplo, que para la variable global ASPLE `z`,
  - La expresión para referirse al contenido es

```
[_z]
```

  - Pero, la expresión para la dirección es

```
_z
```

- Lamentablemente, las funciones reentrantes y recursivas no utilizan nombres explícitos para los parámetros y las variables locales, por lo que la expresión equivalente para su dirección (`ebp+`<desplazamiento> y `ebp-`<desplazamiento>, respectivamente) son incorrectas en NASM.
- NASM proporciona la instrucción `lea` para resolver este problema.

Generación de código para funciones

Localización de dirección de parámetros y variables locales

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- En este curso se va a utilizar la siguiente sintaxis para la instrucción `lea` de NASM

```
lea <registro> [<expresión>]
```

- Donde
  - <registro>, es el nombre de un registro (por ejemplo `eax`)
  - <expresión>, puede ser, por ejemplo `ebp+12`.

Generación de código para funciones

Resumen: tratamiento de identificadores

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Como resumen de estos últimos puntos, considérese el identificador ASPLE `z`. Se utilizará las siguientes expresiones NASM para
  - Aacceder a su contenido
    - Si es una variable global

```
[_z]
```

    - Si es el argumento i-ésimo de una función

```
[ebp+<4+4*i>]
```

    - Si es la variable local i-ésima de una función

```
[ebp-<4*i>]
```


Generación de código para funciones

Resumen: tratamiento de identificadores

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Aacceder a su dirección
  - Si es una variable global

```
_z
```

  - Si es el argumento i-ésimo de una función, lo siguiente deja en el registro `eax` la dirección

```
lea eax, [ebp+<4+4*i>]
```

  - Si es la variable local i-ésima de una función

```
lea eax, [ebp-<4*i>]
```


Generación de código para funciones

Otras modificaciones necesarias

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- Es **muy importante que el alumno propague este tratamiento a todos los lugares donde pueda aparecer un identificador**.
- Es decir, siempre que hay un identificador, se tiene que determinar
  - Si es
    - una variable global
    - una variable local de una función
    - un argumento de una función
  - Si el código que se necesita generar accederá
    - A su contenido
    - A su dirección
- Ya que cada opción necesita un tratamiento diferente.

Generación de código para funciones

Bibliografía

Marina de la Cruz
Alfonso Ortega

- [deMiguel01] Pedro de Miguel Anasagasti, *Fundamentos de los computadores.* Ed. Paraninfo, Thomson Learning. 2001