4. Especificación de la máquina de pila simbólica UDMPs99

JosuKa Díaz Labrador, Andoni Eguíluz Morán
(con la colaboración especial en algún momento de su historia de
Jesús Redrado Redrado, Jorge García Iglesias y Ana Cabana Pérez)

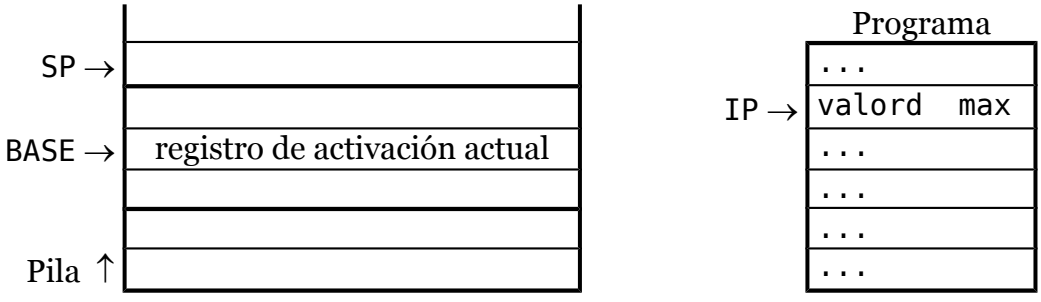
Universidad de Deusto
Versión 1.3β 20150215

Índice

4.1. Introducción

La máquina de pila simbólica UDMPs99 es un código intermedio sencillo —no sirve más que para lenguajes simples, obviamente— que permitirá aproximarse a los conceptos de procesamiento semántico y de generación de código de un compilador.
Se supone que existen tres registros que manejan la pila y el programa:

- SP señala en cada momento la primera posición libre de la pila;
- BASE señala en cada momento el registro de activación actual (ver 4.7);
- IP señala en cada momento la instrucción actual que se ejecuta.



La memoria para los *datos* del programa —variables— se encuentra en la pila, dentro de los diferentes registros de activación.

La especificación es *simbólica* porque se accede a los datos por su nombre —identificadores—, por la existencia de etiquetas para los saltos, y porque en ningún momento se hace uso explícito de los registros internos.

Hay tres tipos de datos: *octetos* —o *bytes*, sirven principalmente para implementar datos de carácter, lo que habitualmente se conoce como `char`—, *enteros* y *reales*. Muchas instrucciones se diferencian según el dato sea octeto (sufijo `b`), entero (sin sufijo o sufijo `i`) o real (sufijo `r`).

En la pila, durante la ejecución, pueden existir también *direcciones* —son también los valores que pueden adoptar los registros `SP`, `BASE` e `IP`—, que se manejan con instrucciones específicas, o en todo caso, con las que admiten operandos enteros.

Los octetos ocupan 1 *byte* —increíble, pero cierto—, los enteros 4 *bytes* y los reales 8 *bytes*. Las direcciones ocupan 4 *bytes*.

El formato de las instrucciones de la máquina de pila es sencillo, ya que solo hay, o bien instrucciones sin argumento, o bien instrucciones con un solo argumento:

- `código_instr`
  es una instrucción sin argumento;
- `código_instr` *argumento*
  es una instrucción con un argumento;

En general, todos los códigos de instrucción son alfabéticos [novedad versión 1.2], aunque en algunos casos siguen siendo válidos los códigos simbólicos equivalentes.

Las instrucciones de la máquina de pila actúan muchas veces, como se sabe, sobre *datos* que se encuentran en la cumbre de la pila; tales datos no deben confundirse con los *argumentos* de la instrucción, que pueden ser —según los casos—:

- *octeto* es una constante literal de tipo octeto; como se usará mayormente para caracteres, se escribirá entre comillas simples un solo carácter —`'a'`—; también se admitirá la notación numérica: en decimal —después de `\`, como `'\85'`— o en hexadecimal —empezando por `\x`, como `'\x1d'`—; en ambos casos, el número deberá ser menor de 256;
- *entero* es una constante literal de tipo entero, que puede venir escrita como en el lenguaje C: en decimal —`1763`—, en octal —si empieza por `0`, como `0736`— o en hexadecimal —si empieza por `0x`, como `0x7e4c8`—;
- *real* es una constante literal de tipo real, que puede venir escrita como en el lenguaje C: con un punto decimal —puede que no haya dígitos antes o después del punto—, y con una parte exponencial opcional;
- *cadena* es una secuencia de caracteres, comenzando y terminando con comillas dobles —`"hola"`—; los caracteres que se admiten son todos los que están por encima del blanco —incluido—, salvo el carácter de las comillas dobles;
- *identificador* es una secuencia que comienza con letra y puede tener letras, números o símbolos del conjunto { `#`, `-`, `_` } —como `hola`, `ho-la`, `h_o#la--`;
- *etiqueta* es un *identificador* precedido del signo `#`.

4.2. Operadores matemáticos

Los operadores matemáticos son instrucciones que no tienen argumentos. Existen normalmente versiones distintas para cada tipo de dato de la máquina de pila —octetos, enteros y reales—. Por lo que respecta a su efecto sobre la pila podemos distinguir dos grupos: los *operadores binarios* y los *operadores unarios*. Los binarios requieren la existencia de dos datos en la cumbre de la pila: el primero de ellos (de la cumbre) será el *segundo operando* y el siguiente el *primer operando*, que siempre han de ser del mismo tipo; entonces, dejan en la pila el resultado, que será del mismo tipo que los operandos, salvo cuando se diga lo contrario. Los operadores unarios sólo extraen el último dato de la pila y dejan el resultado en la pila, que será del mismo tipo que el operando, salvo cuando se diga lo contrario.

4.2.1. Aritméticos

Los operadores aritméticos binarios están representados por los códigos habituales (`pot` es la exponenciación):

- `suma resta mult div pot ≡ + − * / ^ ≡`
  `sumai restai multi divi poti ≡ +i −i *i /i ^i`
  para enteros;
- `sumar restar multr divr potr ≡ +r −r *r /r ^r`
  para reales;
- `sumab restab ≡ +b −b`
  para octetos (solamente existe suma y resta).

En la exponenciación, el primer operando es la base y el segundo el exponente.

Los operadores aritméticos unarios son −respectivamente para enteros, reales y octetos−:

- `neg ≡ negi`
- `negr`
- `negb`

y realizan el cambio de signo aritmético.

Es importante reseñar que los operadores aritméticos no llevan a cabo conversiones de tipo, esto es, sus operandos deben ser del tipo esperado. La máquina de pila posee instrucciones para conversión de tipos (sección 4.2.4).

4.2.2. Relacionales

Los operadores relacionales son −respectivamente para enteros, reales y octetos−:

- `menor mayor menorig mayorig igual noigual ≡`
  `menori mayori menorigi mayorigi iguali noiguali ≡`
  `< > <= >= == != ≡`
  `<i >i <=i >=i ==i !=i`
- `menorr mayorr menorigr mayorigr igualr noigualr ≡`
  `<r >r <=r >=r ==r !=r`
- `menorb mayorb menorigb mayorigb igualb noigualb ≡`
  `<b >b <=b >=b ==b !=b`

En cuanto a su efecto sobre la pila, son binarios, dejando como resultado en la pila *siempre un octeto*, de valor 1 para representar *verdadero* y 0 para representar *falso*.

4.2.3. Lógicos

Existen tres operadores lógicos: `and` y `or` −binarios−, y `not` −unario−; los tres tienen operandos de tipo octeto y producen un octeto como resultado:

- `and`
  toma dos valores de la pila, que deben ser 0 o 1, y si ambos son 1 introduce un 1 en la pila como resultado; en caso contrario introduce un 0;
- `or`
  toma dos valores 0 o 1 de la pila y si alguno de ellos es 1 introduce un 1 en la pila; en caso contrario introduce un 0;
- `not`
  toma un valor de la pila, que debe ser 0 o 1, e introduce el valor contrario al que existía.

4.2.4. Conversión de tipos

Las instrucciones para convertir unos tipos en otros no tienen argumentos y se comportan como operadores unarios:

- `intareal`
  extrae el valor entero de la cima de la pila y lo apila como valor real;
- `intabyte`
  convierte el valor entero situado en la cima de la pila a un valor de octeto; la conversión se realiza desechando los tres *bytes* más significativos: cualquier entero inferior a 128 se convierte en un octeto con el mismo valor, mientras que en otros casos el resultado es indeterminado;
- `byteaint`
  convierte el valor octeto situado en la cima de la pila a entero —del mismo valor numérico si el octeto es inferior a 128, e indeterminado en otros casos—.

Debe notarse que no existe `realaint` (ver a continuación).

4.2.5. Primitivas de cálculo

Todas las primitivas de cálculo son operadores unarios sin argumentos y esperan un operando de tipo real. Toman un operando de la pila, realizan el cálculo y dejan en la pila un resultado.

Las primitivas `sqrt`, `sin`, `cos`, `tan`, `asin`, `acos`, `atan`, `exp` (*e* elevado al operando), `log` (logaritmo decimal) y `ln` (logaritmo neperiano) producen un valor real. Las primitivas `round` y `trunc` —con el significado habitual— producen como resultado un entero.

4.3. Manejo de la pila

Las siguientes instrucciones permiten añadir, quitar, duplicar o intercambiar valores de la pila:

- `insi` *entero*
  introduce el valor *entero* en la pila;
- `insi`
  inserta espacio para un entero, pero sin valor específico (*reserva* de memoria);
- `desapilari`
  elimina un valor entero de la cima de la pila (*liberación* de memoria);
- `insr` *real*
- `insr`
- `desapilarr`
  lo mismo para reales;
- `insb` *octeto*
- `insb`
- `desapilarb`
  lo mismo para octetos;
- `desapilar` *entero*
  elimina el número *entero* de *bytes* de la cima de la pila;
- `copiari`
  duplica el valor entero de la cima de la pila.
- `copiarr`
- `copiarb`
  lo mismo para real y octeto, respectivamente;

- `cambiarir`
  en la cima de la pila hay un real, y debajo un entero; intercambia ambos valores en la pila, dejando el entero en la cima;
- `cambiarii`
- `cambiarrr`
- `cambiarbb`
- `cambiarri`
- `cambiarbi`
- `cambiarib`
- `cambiarbr`
- `cambiarrb`
  lo mismo para otros tipos de datos, según indican los sufijos.

4.4. Control de flujo

Las instrucciones de salto de la máquina de pila tienen un argumento, que siempre es una *etiqueta*:

- `si-cierto-ir-a` *etiqueta*
  toma un operando octeto de la pila; si es cierto (1) salta a *etiqueta*; si es falso (0) sigue en secuencia;
- `si–falso–ir–a` *etiqueta*
  toma un operando octeto de la pila; si es cierto (1) salta a *etiqueta*; si es falso (0) sigue en secuencia;
- `ir–a` *etiqueta*
  salta incondicionalmente a *etiqueta*;
- `etiq` *etiqueta*
  sirve para marcar la posición del programa, es el destino de los saltos a *etiqueta*; por otro lado, un programa puede pasar por esta *pseudoinstrucción* sin provenir de un salto, en el curso secuencial del mismo; en cualquiera de los casos, no tiene ningún efecto sobre la ejecución.

Obviamente, es un error que una instrucción de salto señale a una *etiqueta* que no existe —que no tiene pseudoinstrucción `etiq`—. En cualquier caso, sobre el ámbito de las etiquetas, ver la sección 4.6.

4.5. Primitivas de entrada y salida

Las siguientes instrucciones permiten realizar mínimas operaciones de entrada y salida:

- `leeri`
  toma un valor entero de la entrada estándar —escrito en decimal— y lo deposita en la cima de la pila;
- `leerr`
  toma un valor real de la entrada estándar y lo deposita en la cima de la pila;
- `leerb`
  toma un valor octeto de la entrada estándar —en forma de carácter— y lo deposita en la cima de la pila;
- `escribiri`
- `escribirr`
- `escribirb`
  visualiza el dato de la cima de la pila —que debe ser entero, real u octeto, respectivamente— y lo elimina de la misma;

- `escribirln`
  visualiza una nueva línea; no afecta a la pila;
- `escribirs` *cadena*
  visualiza *cadena*; no afecta a la pila.

4.6. Estructura del programa y subprogramas

Un *programa de máquina de pila* contiene cero o más *declaraciones globales* (ver 4.8) o *subprogramas*, y *un programa principal*. Los subprogramas pueden ser *procedimientos* —sin valor de retorno— o *funciones* —con valor de retorno—, y pueden tener *parámetros*. Los trozos de código de cada subprograma deberían ser compactos, encerrados entre instrucciones específicas (tal como se explica un poco más adelante). Las declaraciones globales y los trozos de código de los subprogramas pueden mezclarse entre sí —o sea, no es obligatorio que *todas* las declaraciones globales aparezcan lo primero—, pero debe tenerse presente que, obviamente y en general, un identificador no puede usarse si no se ha declarado antes.

El programa principal es el conjunto de instrucciones que están entre una instrucción especial llamada `inicio` y el final del programa. No puede incluir declaración de ninguna clase —ni de variables ni de subprogramas, solo pueden ser instrucciones—. Para aclararnos definitivamente, un programa de máquina de pila es:

⟨*ProgMáqPila*⟩ → (⟨*DeclGlobal*⟩ | ⟨*DeclSubprog*⟩)*
`inicio`
⟨*InstrEjecutable*⟩*

Hay que tener en cuenta que las instrucciones de lo que se llama *programa principal* no tienen necesariamente que formar un "todo" lógico y coherente: pueden ser trozos inconexos entre sí —piénsese a este respecto en lo que podría ser un programa en puro lenguaje máquina— a los que se accede a través de un salto desde algún otro punto del programa, incluso desde un subprograma.

Las instrucciones relativas a este asunto son:

- `inicio`
  además de lo dicho, marca el punto en que comenzará la ejecución del programa —por eso debe aparecer una sola vez en el mismo, y fuera de cualquier subprograma—; no tiene ejecución propiamente dicha;
- `fin`
  termina la ejecución del programa; puede aparecer tantas veces como se precise en el programa —incluso dentro del código de subprogramas—.

Las siguientes instrucciones sirven para declarar el comienzo del código de un *subprograma*, y no tienen ejecución propiamente dicha:

- `etiqv` *identificador*
  declara el comienzo de un procedimiento;
- `etiqi` *identificador*
- `etiqr` *identificador*
- `etiqb` *identificador*
  declaran el comienzo de una función que devuelve un entero, un real o un octeto, respectivamente;

La siguiente instrucción sirve para declarar el final del código de un subprograma:

- `fin` *identificador*
  declara el final de un subprograma; sin embargo, la ejecución no debería llegar *nunca* a esta instrucción; en caso de que ocurra así, el intérprete de máquina de pila señalará un *error fatal* y terminará la ejecución.

Como se ha dicho, el código correspondiente a un subprograma debería estar escrito entre las pseudoinstrucciones de comienzo y de final —aunque esto podría no ser así, y aún funcionar el programa, si se dan ciertas condiciones—:

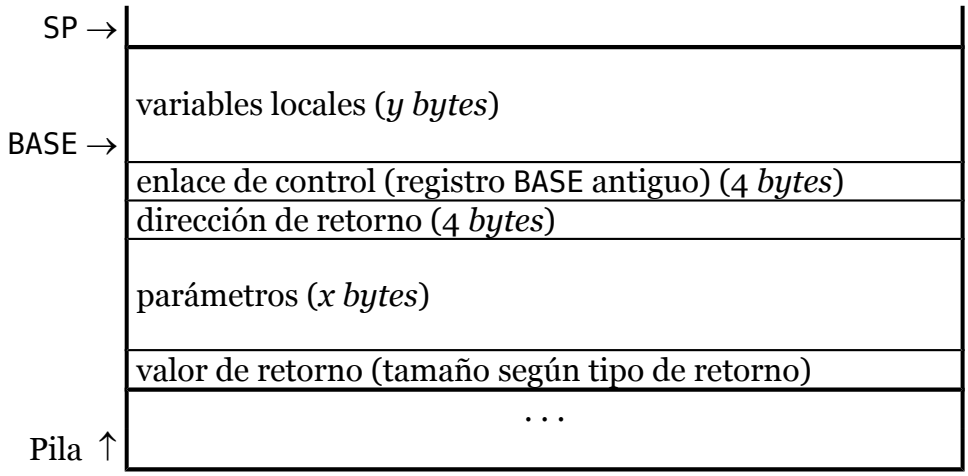
⟨*DeclSubprog*⟩ → `etiq?` *identificador*
⟨*DeclParam*⟩*
(⟨*DeclLocal*⟩ | ⟨*InstrEjecutable*⟩)*
`fin` *identificador*

Las declaraciones de parámetros y de locales se explican en la sección 4.8.

En lo concerniente a las etiquetas de las instrucciones de salto (sección 4.4), sus nombres han de ser únicos a lo largo de todo el programa, incluidos los subprogramas, es decir, su ámbito es global. Por otro lado, una instrucción de salto y la etiqueta a la que se refiere —instrucción `etiq`— pueden estar una dentro de un subprograma y la otra fuera, lo que se conoce como *saltos no locales*. Sin embargo, salvo que se sepa perfectamente lo que se está haciendo, puede garantizarse que se producirán errores fatales en la ejecución, pues es casi seguro que alguna instrucción posterior al salto no tenga sentido dado el estado de la máquina. En cualquier caso, la máquina de pila no hace ninguna comprobación de que un salto sea local o no local.

4.7. Registro de activación

La pila de control es la misma pila de datos. El formato del registro de activación es el recogido en la figura.



Se debe tener presente que cuando se dice que «`SP` es la cumbre de la pila», lo que ocurre es que señala a la primera dirección libre por encima. Es decir, si la cumbre de la pila tiene un entero —o una dirección—, este ocupa los bytes desde `SP` (excluido) hasta `SP`–4 (incluido), hasta `SP`–1 (incluido) si tiene un octeto, y hasta `SP`–8 (incluido) si tiene un real. También ocurre lo mismo con el registro `BASE`.

4.8. Declaración de variables

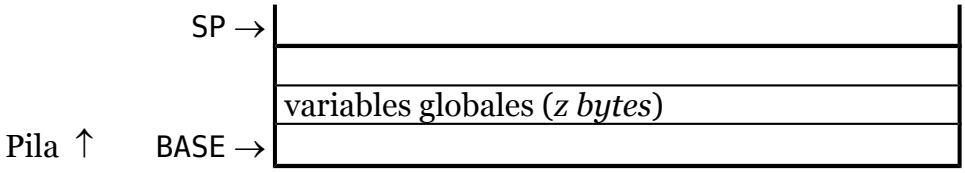
Hay tres clases de instrucciones, que sirven básicamente para declarar un nombre de variable y su tipo, declaraciones que son utilizadas por el intérprete de máquina de pila para acceder luego a los datos mediante los nombres declarados. Se debe tener presente que la memoria para los datos se encuentra en algún lugar de la pila durante la ejecución, y que esta clase de instrucciones sería la que primero debería desaparecer en una "máquina de pila no simbólica". Por eso, algunas de las siguientes instrucciones tienen cierto efecto sobre la pila, además de la propia declaración.

Las variables *globales* son visibles durante todo el programa —salvo si los mismos nombres se declaran como locales o parámetros—, desde el momento en que se declaran con las siguientes instrucciones —categoría ⟨*DeclGlobal*⟩—:

- `globali` *identificador*
- `globalr` *identificador*
- `globalb` *identificador*

Es evidentemente un error si se dan dos declaraciones de esta clase para el mismo *identificador*. Ahora bien, los identificadores de subprogramas —instrucciones `etiq?`, sección 4.6— también son *globales*, por lo que no puede haber una variable global con el mismo nombre que un subprograma ya declarado o viceversa.

Por otro lado, el efecto sobre la pila o la ejecución de las instrucciones `global?` es que se reserva espacio para estas variables en la base de la pila, justo antes de comenzar la ejecución del programa, según indica la siguiente figura:



Los nombres de *parámetros* de subprogramas —categoría ⟨*DeclParam*⟩— son visibles solamente durante el cuerpo del subprograma en que se declaran con:

- `paramb` *identificador*
- `parami` *identificador*
- `paramr` *identificador*

Estas instrucciones no afectan a la ejecución, pero estructuran el espacio —figura de la sección 4.7— reservado a los parámetros de procedimientos o funciones: la primera instrucción `param?` se corresponde con el primer parámetro del subprograma, y así sucesivamente. Por ello, estas instrucciones han de estar *exactamente después* de la etiqueta de comienzo del subprograma. Es un error obvio que haya dos nombres de parámetros iguales en un mismo subprograma, pero un parámetro y un nombre global pueden ser iguales, en cuyo caso este último se dice que queda *sombreado*, pues no puede accederse a él —por su nombre, claro— mientras esté activa la declaración local.

Las variables *locales* —categoría ⟨*DeclLocal*⟩— son visibles solamente durante el cuerpo del subprograma en que se declaran con:

- `localb` *identificador*
- `locali` *identificador*
- `localr` *identificador*

Estas instrucciones sí afectan a la ejecución y a la pila: crean (apilan) espacio —de tamaño correspondiente al tipo y sin valor específico— en la cumbre de la pila para situar la variable. Por ello, estas instrucciones deben colocarse en el punto exacto dentro del cuerpo de un subprograma para que el espacio se cree en el lugar adecuado del registro de activación —sección 4.7—. Está claro que un nombre de variable local no puede ser igual al de otra variable local o parámetro del mismo subprograma, pero puede ser igual a un nombre global, en los mismos términos explicados antes para los parámetros.

En definitiva, existen dos *ámbitos* para la resolución de nombres en la máquina de pila: el *ámbito global* —para nombres de subprogramas y de variables globales—, y el *ámbito local* —para nombres de parámetros y de variables locales—.

En las instrucciones que aparecen en las siguientes secciones que tengan un argumento *identificador*, se supone que la resolución de tal nombre se lleva a cabo del siguiente modo:

- si el nombre está dentro del trozo de código de un subprograma, se examina en primer lugar el ámbito local, y solo si no esta ahí, se pasa al global;
- si el nombre está en una instrucción que no pertenece al código de un subprograma, se examina solo el ámbito global.

Es obviamente un error el que no se encuentre el *identificador* mencionado en una instrucción.

4.9. Acceso a las variables y asignaciones

Las siguientes instrucciones permiten acceder a las variables del programa de máquina de pila —ya sean globales, parámetros o locales—. Se supone que las siguientes instrucciones solo pueden usarse en un ámbito que contenga una variable llamada *identificador*, tal como se explica en la sección 4.8:

- `valord` *identificador*
  inserta el contenido (*r-valor*) de la variable *identificador* en la pila;
- `valori` *identificador*
  inserta la dirección (*l-valor*) de la variable *identificador* en la pila;

Estas últimas instrucciones también pueden usarse, estrictamente dentro del trozo de código de una función, con el *identificador* de la misma:

- `valord` *identificador*
  si *identificador* es el nombre de la función actual, inserta el contenido actual del valor de retorno en la pila;
- `valori` *identificador*
  si *identificador* es el nombre de la función actual, introduce la dirección de su valor de retorno en la pila;

Finalmente, las instrucciones para realizar modificaciones de las variables o datos en general son las siguientes:

- `asigna` ≡ `:=` ≡
  `asignai` ≡ `:=i`
  es la asignación de enteros; extrae dos datos de la pila: el primero en el orden de extracción es un valor entero (*r-valor*), y el segundo es una dirección (*l-valor*); entonces, coloca el *r-valor* en la dirección *l-valor*, y no añade nada en la pila;
- `asignar` ≡ `:=r`
- `asignar` ≡ `:=b`
  igual que lo anterior, pero para reales y octetos, respectivamente.

Es importante recalcar que no hay absolutamente *ninguna comprobación de tipos* en las instrucciones de asignación —ni en ninguna otra instrucción de la máquina de pila—. En primer lugar, la asignación de enteros `asignai` recoge un valor entero de la cima de la pila porque recoge *exactamente el número de bytes* preciso de un valor entero; por lo tanto, es de esperar un funcionamiento erróneo si, antes de `asignai`, en lugar de un entero se introduce otro tipo de valor en la pila. En segundo lugar, se escribe un entero en la dirección *l-valor*, sin comprobar si esa dirección corresponde a una variable entera o no; por lo tanto, también es de esperar un funcionamiento erróneo si, antes de `asignai`, en lugar de la dirección de una variable de tipo entero se introduce la dirección de una variable de algún otro tipo en la pila. Sin casi necesidad de decirlo, el mismo comportamiento se seguirá para las asignaciones de reales y octetos.

4.10. Subprogramas: llamada y retorno

Las siguientes instrucciones se utilizan para los procesos de llamada y retorno, respectivamente:

- `llamar` *identificador*
  guarda la dirección de la siguiente instrucción —*dirección de retorno*— en la pila y salta a la etiqueta del subprograma *identificador*;
- `ret`
- `ret` *entero*
  recoge de la cima de la pila una dirección de retorno, que elimina de la misma junto con tantos *bytes* como indique *entero*, y cede el control a dicha dirección de retorno; si el argumento *entero* no se indica, se supone 0; dado el registro de activación de la sección 4.7, queda claro que el espacio que se desapila es el correspondiente a los parámetros del subprograma.

Las siguientes instrucciones se utilizan durante tales procesos de activación y terminación de los subprogramas —recordar nuevamente la estructura del registro de activación—:

- `ponerbase`
  introduce en la pila el valor —que es una dirección— del registro `BASE`, y asigna a este el valor de `SP`; por lo tanto, `BASE` queda señalando la posición de la pila que es la cima en este momento;
- `cogerbase`
  saca el valor —que es una dirección— de la cima de la pila y lo carga en `BASE`; son exactamente las operaciones contrarias a las que realiza `ponerbase`.

4.11. El intérprete UDMPs99

El intérprete del lenguaje de máquina de pila ejecuta los programas de máquina de pila, que se supone residen en archivos con la extensión `mpv`. Así:

```
udmps99 miprog
```

ejecutará el programa del archivo `miprog.mpv`. El intérprete procesa el programa —si encuentra errores, informa de ello y además genera el archivo `miprog.err`—, y genera un archivo llamado `miprog.mpn`, en lenguaje de máquina de pila *no simbólica*, como indicación de lo que realmente se pasa a ejecutar. En este lenguaje no simbólico, se han eliminado todas las declaraciones de variables —las pseudoinstrucciones de la sección 4.8— y se han sustituido los identificadores de las instrucciones `valori` y `valord` por referencias a memoria.

Existen mínimas ayudas de depuración, a través de las opciones de ejecución:

```
udmps99 [-d|-o|-c] miprog
```

- `-d`
  debug: genera el archivo `miprog.log` con la traza, es decir, se escribe cada instrucción según se va ejecutando;
- `-o`
  output: copia en el archivo `miprog.out` las operaciones de entrada y salida;
- `-c`
  check: solo comprueba que el programa `miprog.mpv` sea correcto, sin ejecutarlo.

Esperamos que no sea una gran noticia que advirtamos de lo *peligrosas* que pueden llegar a ser las dos primeras opciones.

4.12. Historia, agradecimientos y referencias

El lenguaje de código intermedio UDMPs99 empezó a gestarse por Andoni Eguíluz y JosuKa Díaz, incluso ya desde el año 1993, siendo al principio una versión aumentada, si cabe el atrevimiento, del código usado por Aho, Sethi y Ullman [1990] en el mítico *libro del dragón* con el que todos aprendimos compiladores. Una versión inicial completamente funcional fue terminada por JosuKa para su tesis en 1994-1996, para un compilador de PASCAL que optimizaba la recursividad final (en ciertas condiciones [Díaz-Labrador 1996]). La máquina era código intermedio válido para un subconjunto de PASCAL suficientemente significativo, y el intérprete estaba escrito en SCHEME (como el resto del compilador), lo que aportaba un grado adicional de abstracción y ausencia de errores que, vistas desde la distancia, resultan de todavía más valor.

El impulso dado a la misma idea por esa misma época por el lenguaje JAVA [Gosling, Joy y Steele 1996] y la JAVA VIRTUAL MACHINE [Lindholm y Yellin 1996] (a la postre y salvando las distancias, un lenguaje de máquina de pila conceptualmente idéntico, pero completamente desarrollado y no simbólico) vino a ser el revulsivo que faltaba para que Andoni Eguíluz y JosuKa Díaz decidieran desarrollar unas buenas prácticas de compiladores, y la necesidad de contar con un código intermedio real y funcional.

El primer desarrollo técnico de la máquina virtual fue llevado a cabo por Jesús Redrado durante el curso 1996-1997. En el siguiente curso, Jorge García (ayudante de las prácticas), realizó una de las labores más importantes, al construir el intérprete de la primera versión operativa, entonces llamada UDMPs98. Durante el curso 1998-1999, Ana Cabana primero, y Sergio Argüello y José David Vázquez después, realizaron diversas correcciones de errores, y añadieron diversos cambios de la especificación, para llegar a lo que fue la versión definitiva, llamada UDMPs99. El intérprete se escribió en C/C++, con un analizador léxico, obviamente, en FLEX, pero generando el *scanner* en C++. Lamentablemente, solo se compiló para DOS/WINDOWS, y la versión final tiene fecha de 19 de abril de 1999.

Una versión mejorada de esta máquina de pila se intentó desarrollar para servir a la implementación del lenguaje de programación en euskera llamado EPI [Guenaga *et al.* 2002], pero ahora mismo no recordamos que llegara a buen puerto…

Por otro lado, diversas circunstancias llevaron a la imposibilidad de continuar con el enorme esfuerzo que requerían aquellas prácticas de compiladores, por lo que el intérprete quedó "dormido" durante años… hasta que en 2006 volvieron a retomarse, en forma mucho más sencilla. Enseguida se planteó el doble objetivo de eliminar errores del código y, sobre todo, hacerlo disponible para GNU/LINUX y otras máquinas.

Varias personas han hecho muy valiosos esfuerzos en este sentido, pero la poca disponibilidad de tiempo de JosuKa y Andoni para culminar el proceso hizo que no llegara a su final: Igor Ruiz en 2007 y David Ausín en 2008 aportaron mejoras considerables, recopiladas por JosuKa en una versión intermedia de octubre de 2009, pero que producía ciertos errores de ejecución que no pudieron resolverse (y que el tiempo ha demostrado que provenían de la primera versión).

Finalmente, en febrero de 2011, la gran ayuda de Endika Gutiérrez y Luis Rodríguez conduce a la solución de los errores conocidos (lo que no quiere decir que no haya otros desconocidos) y la posibilidad de "liberar" finalmente una versión multiplataforma (1.1β), probada en diversas versiones de WINDOWS y de GNU/LINUX, tanto de 32 bits como de 64 bits. Dicho lo de liberar en el sentido estricto del término, ya que esta versión se publica bajo la licencia GPL.

Nuestro agradecimiento por tanto a todas las personas que aquí se han mencionado, sin cuya ayuda este proyecto no habría sido posible (literalmente).

4.12.1. Referencias

- Alfred V. Aho, Ravi Sethi, Jeffery D. Ullman [1990] *Compiladores: principios, técnicas y herramientas*, Adisson-Wesley Iberoamericana: México; traducción al castellano de Alfred V. Aho, Ravi Sethi, Jeffery D. Ullman [1986] *Compilers: Principles, Techniques, and Tools*, Adisson-Wesley: Reading, Massachusetts.
- JosuKa Díaz Labrador [1996] *Implementación eficiente de la recursividad final en lenguajes imperativos basada en nuevas técnicas de compilación*, tesis doctoral, Universidad de Deusto.
- JosuKa Díaz Labrador, Andoni Eguíluz [1998] *Compiladores II*.
- Andoni Eguíluz, JosuKa Díaz Labrador [1995] *Teoría de compiladores. Primer parcial.*
- James Gosling, Bill Joy, Guy Steele [1996] *The Java Language Specification*, Adisson-Wesley: Reading, Massachusetts.
- Mª Luz Guenaga, Andoni Eguíluz, JosuKa Díaz, David López, José Ignacio Herrero, Ricardo Casas, Iñaki Páramo, Daniel Yohn [2002] *EPI konpiladorea: gida didaktikoa*, EDEX: Bilbao.
- Tim Lindholm, Frank Yellin [1996] *The Java Virtual Machine Specification*, Adisson-Wesley: Reading, Massachusetts.

4.13. Ejemplo de conversión de AJK a máquina de pila

4.13.1. Código fuente

```
int   e1, e2;
real  numr1;

function factorial( int n ) return (int)
{
      if (n == 1) return 1;
      else return n*factorial(n-1);
}

function potencia( real base; int exponente ) return (real)
int   i;
real  pot;
{
      i := 1;
      pot := 1;
      while (i <= exponente)
            pot := base * pot;
      return( pot );
}

function stirling (real n) return (real)
real pi, e;
{
      pi := 3.14159;
      e := 2.72;
      return( sqrt( 2*n*pi ) * (n/e)^n * (1+1/(12*n)) );
}

procedure main ()
int   numero, i;
int   fact;
real  stirn;
{
      numero := readint();
      i := 0;
      while (i < numero ) {
```

```
            fact := factorial( numero );
            stirn := stirling( numero );
            writeln( fact );
            writeln( stirn );
            writeln( stirn - fact );
            i := i + 1;
      }
      return;
}
```

4.13.2. Traducción a máquina de pila simbólica

```
;int  e1, e2;

      globali     e1          ; datos globales
      globali     e2

;real numr1;

      globalr     numr1

;function factorial( int n ) return (int)

      etiqi       factorial   ; función factorial
      parami      n           ; parámetro

      ponerbase               ; actualiza BASE

;     if (n == 1)

      valord      n
      insi        1
      igual
      si-falso-ir-a #elseif1

;           return 1;

      valori      factorial   ; empieza asignación valor retorno
      insi        1
      asigna                  ; termina asignación valor retorno
      ir-a        #factorial  ; va a secuencia de retorno

;     else

      ir-a        #finif1
      etiq        #elseif1

;           return n*factorial(n-1);

      valori      factorial   ; empieza asignación valor retorno
      valord      n
                              ; empieza llamada
      insi                    ; espacio para valor de retorno
      valord      n
      insi        1
      resta                   ; parámetro (n-1) de llamada a factorial
      llamar      factorial   ; termina llamada
      multi
      :=                      ; termina asignación valor retorno
      ir-a        #factorial  ; va a secuencia de retorno
      etiq        #finif1

;}

      ir-a        #EXE001
      etiq        #factorial  ; empieza secuencia de retorno
      cogerbase               ; recuperar BASE
      ret         4           ; retorno desapilando parámetros
      fin         factorial   ; aquí no debería llegar
```

```
;function potencia( real base; int exponente ) return (real)

      etiqr       potencia
      paramr      base
      parami      exponente

      ponerbase

;int  i;
;real pot;

      locali      i           ; datos locales aquí (después de ponerbase)
      localr      pot

;{
;     i := 1;

      valori      i
      insi        1
      :=i

;     pot := 1;

      valori      pot
      insi        1
      intareal
      asignar

;     while (i <= exponente)

      etiq        #iniWhile1
      valord      i
      valord      exponente
      menorig
      si-falso-ir-a #finWhile1

;           pot := base * pot;

      valori      pot
      valord      base
      valord      pot
      multr
      :=r
      ir-a        #iniWhile1
      etiq        #finWhile1

;     return( pot );

      valori      potencia
      valord      pot
      :=r
      ir-a        #potencia

;}

      ir-a        #EXE001
      etiq        #potencia
      desapilar   12          ; saca locales de la pila; también podría ser
                              ;     desapilarr
                              ;     desapilari
      cogerbase
      ret         12
      fin potencia

;function stirling (real n) return (real)

      etiqr       stirling
      paramr      n
```

```
      ponerbase

;real pi, e;

      localr      pi
      localr      e

;{
;     pi := 3.14159;

      valori      pi
      insr        3.14159
      :=r

;     e := 2.72;

      valori      e
      insr        2.72
      asignar

;     return( sqrt( 2*n*pi ) * (n/e)^n * (1+1/(12*n)) );

      valori      stirling    ; empieza asignación valor retorno
      insi        2
      valord      n
      cambiarir
      intareal
;     cambiarri               ; no es necesario por la conmutatividad
      multr
      valord      pi
      *r
      sqrt
      valord      n
      valord      e
      /r
      valord      n
      ^r
      *r
      insi        1
      insi        1
      insi        12
      valord      n
      cambiarir
      intareal
;     cambiarri               ; idem
      multr
      cambiarir
      intareal
      cambiarrr
      divr
      cambiarir
      intareal
;     cambiarri               ; idem
      sumar
      multr
      asignar                 ; termina asignación valor de retorno
      ir-a        #stirling

;}

      ir-a        #EXE001
      etiq        #stirling   ; empieza secuencia de retorno
      desapilar   16          ; o también:       desapilarr
                              ;                  desapilarr
      cogerbase
      ret         8
      fin         stirling

;procedure main ()
```

```
      etiqv       main        ; es otro procedimiento más
      ponerbase               ; sin parámetros

;int  numero, i;
;int  fact;
;real stirn;

      locali      numero      ; locales del programa principal
      locali      i
      locali      fact
      localr      stirn

;{
;     numero := readint();

      valori      numero
; puede ponerse lo siguiente:
;     escribirs   "Escribe un número entero "
      leeri
      :=

;     i := 0;

      valori      i
      insi        0
      asigna

;     while (i < numero ) {

      etiq        #iniWhile2
      valord      i
      valord      numero
      <
      si-falso-ir-a #finWhile2

;           fact := factorial( numero );

      valori      fact
      insi
      valord      numero
      llamar      factorial
      :=

;           stirn := stirling( numero );

      valori      stirn
      insr
      valord      numero
      intareal
      llamar      stirling
      :=r

;           writeln( fact );

      valord      fact
      escribiri
      escribirln

;           writeln( stirn );

      valord      stirn
      escribirr
      escribirln

;           writeln( stirn - fact );

      valord      stirn
      valord      fact
```

```
       intareal
       restar
       escribirr
       escribirln

;            i := i + 1;

       valori      i
       valord      i
       insi        1
       suma
       :=

;      }

       ir-a        #iniWhile2
       etiq        #finWhile2

;      return;

       ir-a        #main

;}

       ir-a        #EXE001
       etiq        #main
       desapilar   36
       cogerbase
       ret
       fin         main

; empieza programa principal de máquina de pila

       inicio                  ; aquí empezará la ejecución
       llamar      main        ; se llama al programa principal AJK
       fin                     ; aquí se detiene la ejecución

; esta parte también se considera programa principal
; aunque parezca desconectada del resto

       etiq        #EXE001
       escribirln
       escribirs   "Error EXE001"
       escribirln
       escribirs   "Procedimiento o funcion no retorna"
       escribirln
       escribirs   "Programa terminado"
       fin
```

4.14. Historial

Versión 1.0ß 19990419
Versión 1.1ß 20110315
Versión 1.2ß 20110322
Versión 1.3ß 20150215