

Apuntes de Teoría de la Programación

11 de abril de 2021

Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Un ejemplo de la lógica	1
1.2. Métodos de descripción semántica	2
1.2.1. Semántica operacional	2
1.2.2. Semántica denotacional	2
1.2.3. Semántica axiomática	3
1.3. El lenguaje While	3
1.4. Semántica para expresiones	4
1.5. Propiedades semánticas	6
1.5.1. Variables libres	7
1.5.2. Sustitución	8
2. Semántica operacional	10
2.1. Semántica operacional natural	10
2.1.1. Sistema de transiciones	10
2.1.2. Propiedades	12
2.1.3. Expresiones	17
2.2. Semántica operacional estructural	18
2.2.1. Sistema de transiciones	18
2.2.2. Propiedades	20
2.2.3. Expresiones	23
2.3. Teorema de equivalencia	24
3. Más semántica operacional	25
3.1. Construcciones no secuenciales	25
3.1.1. <code>abort</code>	25
3.1.2. <code>or</code>	26
3.1.3. <code>par</code>	27
3.2. Bloques y declaración de variables	28
3.2.1. Bloques y declaraciones simples	28
3.2.2. Procedimientos	29
3.2.3. Ámbito dinámico para variables y procedimientos	31
3.2.4. Ámbito estático para procedimientos	32
3.2.5. Ámbito estático para variables y procedimientos	33
4. Implementación correcta	36
4.1. Máquina abstracta	36
4.1.1. Configuraciones e introducciones	36
4.1.2. Propiedades semánticas	37
4.1.3. Función de ejecución	38
4.2. Traducción	38

1 | Introducción

1.1. Un ejemplo de la lógica

La pregunta que motiva todo lo siguiente es: ¿qué es el significado? O, más concretamente, ¿cuál es la relación entre la sintaxis y la semántica? Aunque aquí nos centraremos principalmente en especificar el comportamiento de programas, parece conveniente presentar un ejemplo relacionado con la lógica. Recordemos que, en lógica de primer orden, disponíamos de un método para asignar un valor semántico a cada expresión. En este caso, el valor semántico que nos interesa es la *denotación*, es decir, que por ejemplo $\varphi \vee \psi$ denota lo verdadero en función de φ y ψ . El método consistía en:

- Asumir que las fórmulas atómicas tienen una denotación fija, es decir, podemos determinar previamente si es V o F.
- Las denotaciones de $\varphi \vee \psi$, $\neg\varphi$ quedan determinadas por las tablas de verdad correspondientes y el paso anterior.
- La denotación de $\forall x.\varphi$ es V si y solo si, para cada a posible, la denotación de $\varphi[a/x]$ es V.

Con esto ya sabríamos responder a la primera pregunta que nos hicimos para la lógica de primer orden. Sin embargo, esta aproximación no es la única. Pensemos en el concepto de ‘prueba’ en un sentido computacional. En vez de enfocar el valor semántico hacia la denotación, preguntémonos cuándo un enunciado ‘tiene una prueba’. Así obtenemos un método alternativo:

- Asumir que, para las fórmulas atómicas, conocemos lo que significa una prueba. Por ejemplo, la prueba de que $2 + 2 = 4$ consiste en operar con lápiz y papel.
- Una prueba de $\varphi \wedge \psi$ es un par (r, s) donde r es una prueba de φ y donde s es una prueba de ψ .
- Una prueba de $\varphi \vee \psi$ es un par (k, r) , donde o bien $r = 0$ y r es prueba de φ o bien $k = 1$ y r es prueba de ψ .
- Una prueba de $\varphi \rightarrow \psi$ es una función que lleva pruebas de φ en pruebas de ψ .
- Una prueba de $\neg\varphi$ es una prueba de $\varphi \rightarrow \perp$, donde \perp no admite prueba.
- Una prueba de $\forall x.\varphi$ es una función que lleva cada elemento posible a en una prueba de $\varphi[a/x]$.
- Una prueba de $\exists x.\varphi$ es un par (a, r) donde a es un elemento posible y r es una prueba de $\varphi[a/x]$.

¿Qué ha ocurrido aquí? Hemos dado un valor semántico diferente a la sintaxis lógica usual. Nos encontraremos con situaciones similares a ésta a lo largo del curso pero, en vez de hablar de ‘proposiciones’ y ‘fórmulas’ trataremos ‘programas’.

1.2. Métodos de descripción semántica

Consideremos un programa como $z := x; x := y; y := z$. Un análisis sintáctico nos dice que tenemos tres expresiones separadas por ‘;’ y que cada una tiene la forma de una variable separada de otra por ‘:=’. El análisis semántico depende en gran medida del sintáctico: será entonces conveniente asumir programas que estén sintácticamente bien escritos, como en este ejemplo. La asignación de un valor semántico para tal expresión se tiene que realizar necesariamente en dos pasos:

- (i) Dar un significado a expresiones separadas por ‘;’.
- (ii) Dar un significado a expresiones formadas por una variable seguida de ‘:=’ y una expresión.

Nosotros nos centraremos en lo sucesivo en tres enfoques distintos (aunque complementarios) para dar significado a expresiones bien formadas.

1.2.1. Semántica operacional

Aquí el valor semántico recae sobre el efecto que tiene el programa sobre la máquina en la que se ejecuta, es decir, una descripción operacional os dirá cómo ejecutar el programa que presentamos antes:

- (i) Para ejecutar una serie de expresiones separadas por ‘;’, las ejecutamos una a una de izquierda a derecha.
- (ii) Para ejecutar una expresión formada por una variable seguida de ‘:=’ y una variable, determinamos el valor de la segunda variable y se lo damos a la primera.

Por tanto, si ejecutamos el programa $z := x; x := y; y := z$ suponiendo que tenemos las asignaciones iniciales $[x \mapsto 5, y \mapsto 7, z \mapsto 0]$, tenemos:

$$\begin{aligned} \langle z := x; x := y; y := z, [x \mapsto 5, y \mapsto 7, z \mapsto 0] \rangle &\rightarrow \\ \langle x := y; y := z, [x \mapsto 5, y \mapsto 7, z \mapsto 5] \rangle &\rightarrow \\ \langle y := z, [x \mapsto 7, y \mapsto 7, z \mapsto 5] \rangle &\rightarrow \\ [x \mapsto 7, y \mapsto 5, z \mapsto 5] & \end{aligned}$$

Esto es lo que se denomina *semántica operacional estructural*. Pero podemos seguir un procedimiento distinto que muestra menos pasos del proceso anterior:

$$\frac{\frac{\langle z := x, s_0 \rangle \rightarrow s_1 \quad \langle x := y, s_1 \rangle \rightarrow s_2}{\langle z := x; x := y, s_0 \rangle \rightarrow s_2} \quad \langle y := z, s_2 \rangle \rightarrow s_3}{\langle z := x; x := y; y := z, s_0 \rangle \rightarrow s_3}$$

Siendo:

$$\begin{aligned} s_0 &:= [x \mapsto 5, y \mapsto 7, z \mapsto 0], s_1 := [x \mapsto 5, y \mapsto 7, z \mapsto 5], \\ s_2 &:= [x \mapsto 7, y \mapsto 7, z \mapsto 5], s_3 := [x \mapsto 5, y \mapsto 5, z \mapsto 5]. \end{aligned}$$

Es decir, aquí hemos resumido toda la información en $\langle e, s \rangle \rightarrow t$, que simboliza el hecho de que, al ejecutar la expresión e en el estado s , pasamos al estado t .

1.2.2. Semántica denotacional

En este punto de vista, el valor semántico se encuentra en el efecto de cómo se ejecutan los programas. En el caso que tratamos:

- (i) El efecto de una serie de expresiones separadas por ‘;’ consiste en la composición de los efectos de las expresiones.

- (ii) El efecto de una expresión formada por una variable seguida por ‘:=’ y otra variable es una función que lleva un estado en uno nuevo, formado a partir del original haciendo que el valor de la primera variable sea el de la segunda.

Es decir, tenemos:

$$\mathcal{S}[\mathbf{z} := \mathbf{x}; \mathbf{x} := \mathbf{y}; \mathbf{y} := \mathbf{z}] = \mathcal{S}[\mathbf{y} := \mathbf{z}] \circ \mathcal{S}[\mathbf{x} := \mathbf{y}] \circ \mathcal{S}[\mathbf{z} := \mathbf{x}]$$

Y por tanto,

$$\begin{aligned} & \mathcal{S}[\mathbf{z} := \mathbf{x}; \mathbf{x} := \mathbf{y}; \mathbf{y} := \mathbf{z}]([\mathbf{x} \mapsto 5, \mathbf{y} \mapsto 7, \mathbf{z} \mapsto 0]) \\ &= \mathcal{S}[\mathbf{y} := \mathbf{z}](\mathcal{S}[\mathbf{x} := \mathbf{y}](\mathcal{S}[\mathbf{z} := \mathbf{x}]([\mathbf{x} \mapsto 5, \mathbf{y} \mapsto 7, \mathbf{z} \mapsto 0]))) \\ &= \mathcal{S}[\mathbf{y} := \mathbf{z}](\mathcal{S}[\mathbf{x} := \mathbf{y}]([\mathbf{x} \mapsto 5, \mathbf{y} \mapsto 7, \mathbf{z} \mapsto 5])) \\ &= \mathcal{S}[\mathbf{y} := \mathbf{z}]([\mathbf{x} \mapsto 7, \mathbf{y} \mapsto 7, \mathbf{z} \mapsto 5]) \\ &= [\mathbf{x} \mapsto 7, \mathbf{y} \mapsto 5, \mathbf{z} \mapsto 5]. \end{aligned}$$

Nótese lo que hemos conseguido aquí: hemos traducido el funcionamiento del programa a una serie de objetos matemáticos. Esto será de ayuda en el futuro.

1.2.3. Semántica axiomática

Dado un programa, decimos que es *parcialmente correcto* respecto de una premisa y una consecuencia si, cuando el estado inicial verifica la premisa y el programa termina, el estado final verifica la consecuencia. En nuestro caso, tenemos la propiedad:

$$\{\mathbf{x} = \mathbf{n} \wedge \mathbf{y} = \mathbf{m}\} \mathbf{z} := \mathbf{x}; \mathbf{x} := \mathbf{y}; \mathbf{y} := \mathbf{z} \{ \mathbf{y} = \mathbf{n} \wedge \mathbf{x} = \mathbf{m} \}$$

Nótese que esta propiedad no asegura que el programa termine. Desde este punto de vista, lo que queremos es construir un sistema lógico para demostrar la corrección parcial de un programa. En cambio, como veremos, ciertos aspectos de los programas no serán tenidos en cuenta. La deducción de la corrección parcial del programa de ejemplo es la siguiente:

$$\frac{\frac{\{p_0\} \mathbf{z} := \mathbf{x} \{p_1\} \quad \{p_1\} \mathbf{x} := \mathbf{y} \{p_2\}}{\{p_0\} \mathbf{z} := \mathbf{x}; \mathbf{x} := \mathbf{y} \{p_2\}} \quad \{p_2\} \mathbf{y} := \mathbf{z} \{p_3\}}{\{p_0\} \mathbf{z} := \mathbf{x}; \mathbf{x} := \mathbf{y}; \mathbf{y} := \mathbf{z} \{p_3\}}$$

Donde

$$\begin{aligned} p_0 &:= \mathbf{x} = \mathbf{n} \wedge \mathbf{y} = \mathbf{m}, p_1 := \mathbf{z} = \mathbf{n} \wedge \mathbf{y} = \mathbf{m}, \\ p_2 &:= \mathbf{z} = \mathbf{n} \wedge \mathbf{x} = \mathbf{m}, p_3 := \mathbf{y} = \mathbf{n} \wedge \mathbf{x} = \mathbf{m}. \end{aligned}$$

Aunque se pueda observar cierta similitud con el enfoque operacional, la diferencia es que aquí trabajamos con aserciones que no tienen en cuenta el funcionamiento del programa. La ventaja de esto consiste en que podemos describir fácilmente determinadas propiedades de tal programa.

1.3. El lenguaje While

Veamos a continuación un ejemplo que iremos desarrollando durante el curso, el lenguaje **While**. Para especificar las *categorías sintácticas*, especificamos una *metavariable* específica que toma valores en los elementos de cada una:

- Numerales: $n \in \mathbf{Num}$.
- Variables: $x \in \mathbf{Var}$.
- Expresiones aritméticas: $a \in \mathbf{Aexp}$.
- Expresiones booleanas: $b \in \mathbf{Bexp}$.

- Sentencias: $S \in \mathbf{Stm}$.

En caso de que hiciera falta emplear más de una metavariable, emplearemos, por ejemplo, n', n'', \dots y n_1, n_2, \dots . Supondremos que las categorías **Num** y **Var** se construyen de manera natural. Las categorías sintácticas **Aexp**, **Bexp** y **Stm** se construyen, respectivamente, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} a &::= n \mid x \mid a_1 + a_2 \mid a_1 \times a_2 \mid a_1 - a_2 \\ b &::= \mathbf{true} \mid \mathbf{false} \mid a_1 = a_2 \mid a_1 \leq a_2 \mid \neg b \mid b_1 \wedge b_2 \\ S &::= x := a \mid \mathbf{skip} \mid S_1; S_2 \mid \mathbf{if } b \mathbf{ then } S_1 \mathbf{ else } S_2 \mid \mathbf{while } b \mathbf{ do } S \end{aligned}$$

Si volvemos al ejemplo de antes, la expresión $\mathbf{z} := \mathbf{x}; \mathbf{x} := \mathbf{y}; \mathbf{y} := \mathbf{z}$, podemos definir una *sintaxis concreta*, en el sentido de que, de los diferentes árboles de derivación para tal expresión, debemos escoger uno. En cambio, lo que acabamos de definir arriba es un ejemplo de *sintaxis abstracta*, y los árboles de derivación posibles son todos distintos elementos de la categoría **Stm**. De hecho, en caso de que queramos expresar la prioridad de las operaciones, lo haremos mediante el uso de paréntesis.

1.4. Semántica para expresiones

Veamos, a modo de ejemplo, cómo dar significado a los numerales. Expresaremos la gramática de **Num** por

$$n ::= 0 \mid 1 \mid n0 \mid n1$$

Intepretaremos los numerales como si fuesen la expresión binaria de un número natural. Es decir, se tendrá una *aplicación semántica* $\mathcal{N} : \mathbf{Num} \rightarrow \mathbb{Z}$ dada recursivamente por:

$$\begin{aligned} \mathcal{N}[0] &= 0 \\ \mathcal{N}[1] &= 1 \\ \mathcal{N}[n0] &= 2 \otimes \mathcal{N}[n] \\ \mathcal{N}[n1] &= 2 \otimes \mathcal{N}[n] \oplus 1 \end{aligned}$$

Donde \oplus, \otimes expresan las operaciones de suma y producto en \mathbb{Z} y 0, 1, 2 los enteros correspondientes: la distinción entre objetos sintácticos y semánticos tiene que ser cuidadosa. Las igualdades anteriores se llaman *ecuaciones semánticas*, nos indican cómo asociar un objeto matemático a un símbolo. Además, tenemos aquí un ejemplo de lo que se llama el *principio de composición*, es decir, construimos el significado de una expresión (*elemento compuesto*) en función del de sus componentes (*elementos base*). Ésto facilita aplicar el método de demostración general que seguiremos, la *inducción estructural*, que consiste en primero demostrar una propiedad para cada elemento base y después demostrarla para los compuestos empleando la hipótesis de inducción. Veamos un ejemplo a continuación.

Primero recordemos que una función $f : A \rightarrow B$ es *parcial* si hay elementos $a \in A$ en los que no está definida. En caso contrario, se denomina *función total*.

Proposición 1.1. *La función $\mathcal{N} : \mathbf{Num} \rightarrow \mathbb{Z}$ es total.*

Demostración. Por inducción. De los siguientes casos, (a), (b) son los casos base y (c), (d) los *inductivos*:

- (a) Si $n = 0$, $\mathcal{N}[n] = 0$.
- (b) Si $n = 1$, $\mathcal{N}[n] = 1$.
- (c) Si $n = m0$, $\mathcal{N}[n] = \mathcal{N}[m0] = 2 \otimes \mathcal{N}[m]$, y por hipótesis de inducción tenemos el resultado.
- (d) Análogo a (c).

□

Ejemplo 1.2. Definamos una gramática y una semántica asociada para interpretar los numerales (binarios), de modo que el primer caracter de cada cadena represente el signo (positivo o negativo) del número representado por el resto de la misma. Una gramática posible es:

$$n ::= 0 \mid 1 \mid 0n \mid 1n$$

Definiremos su semántica atendiendo a que las cadenas 0 y 1 representan el número 0, pues se compondrían solo del signo, sin acompañar ningún número.

La función semántica es $\mathcal{S} : \mathbf{Num} \rightarrow \mathbb{Z}$, definida por:

$$\begin{aligned}\mathcal{S}[0] &= 0 \\ \mathcal{S}[1] &= 0 \\ \mathcal{S}[0n] &= \mathcal{N}[n] \\ \mathcal{S}[1n] &= -\mathcal{N}[n]\end{aligned}$$

Notemos el siguiente detalle: en principio, la función \mathcal{N} , como tal, no puede tomar valores del modo anterior. Sin embargo, se puede probar que, como la gramática que dimos en la definición de \mathcal{N} y la que hemos escrito arriba generan las mismas cadenas, la función \mathcal{N} se puede identificar fácilmente con la función que buscamos.

Pese a ello es posible definir dicha función de la siguiente forma

$$\begin{aligned}\mathcal{N}[0] &= 0 \\ \mathcal{N}[1] &= 1 \\ \mathcal{N}[0n] &= \mathcal{AUX}[n, 0] \\ \mathcal{N}[1n] &= \mathcal{AUX}[n, 1]\end{aligned}$$

y la función $\mathcal{AUX} : \mathbf{Num} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$

$$\begin{aligned}\mathcal{AUX}[0, x] &= 2 \otimes x \\ \mathcal{AUX}[1, x] &= 2 \otimes x \oplus 1 \\ \mathcal{AUX}[0n, x] &= \mathcal{AUX}[n, 2 \otimes x] \\ \mathcal{AUX}[1n, x] &= \mathcal{AUX}[n, 2 \otimes x \oplus 1]\end{aligned}$$

donde el segundo parámetro representa un acumulador. Por construcción de la gramática la lectura de la cadena se hace de izquierda a derecha, dificultando un poco la construcción de la semántica.

Desde la perspectiva de la semántica denotacional, el significado de una expresión está determinado por los valores que toman en ella las variables. Esto motiva el concepto de *estado*, definido en nuestro caso como un elemento del conjunto $\mathbf{State} := \mathbf{Var} \rightarrow \mathbb{Z}$, es decir, como una función que lleva una variable en su valor (un entero positivo). Por tanto, el significado de la expresión viene dado por una función auxiliar $\mathcal{A} : \mathbf{Aexp} \rightarrow (\mathbf{State} \rightarrow \mathbb{Z})$, donde \mathcal{A} toma una expresión aritmética y un estado s^1 :

$$\begin{aligned}\mathcal{A}[n]s &= \mathcal{N}[n] \\ \mathcal{A}[x]s &= s\ x \\ \mathcal{A}[a_1 + a_2]s &= \mathcal{A}[a_1]s \oplus \mathcal{A}[a_2]s \\ \mathcal{A}[a_1 \times a_2]s &= \mathcal{A}[a_1]s \otimes \mathcal{A}[a_2]s \\ \mathcal{A}[a_1 - a_2]s &= \mathcal{A}[a_1]s \ominus \mathcal{A}[a_2]s\end{aligned}$$

Ejemplo 1.3. Podemos añadir a la definición la ecuación semántica

$$\mathcal{A}[-a]s = 0 \ominus \mathcal{A}[a]s$$

Incluso podemos prescindir del 0 por cómo está definida \ominus . En cambio,

$$\mathcal{A}[-a]s = \mathcal{A}[0 - a]s$$

no está definida de forma composicional.

¹Nótese que \mathcal{A} nos lleva a a una función $\mathcal{A}[a]$ y aplicamos tal función a s escribiendo $\mathcal{A}[a]s$. Por otro lado, con $s\ x$ nos referimos a s aplicado a x .

Se puede repetir el procedimiento anterior para definir una función semántica para los booleanos, $\mathcal{B} : \mathbf{Bexp} \rightarrow (\mathbf{State} \rightarrow \mathbf{Bool})$, siendo $\mathbf{Bool} := \{\mathbf{tt}, \mathbf{ff}\}$, definida por:

$$\begin{aligned} \mathcal{B}[\mathbf{true}]s &= \mathbf{tt} \\ \mathcal{B}[\mathbf{false}]s &= \mathbf{ff} \\ \mathcal{B}[a_1 = a_2]s &= \begin{cases} \mathbf{tt}, & \text{si } \mathcal{A}[a_1]s \text{ es igual a } \mathcal{A}[a_2]s \\ \mathbf{ff}, & \text{en otro caso} \end{cases} \\ \mathcal{B}[a_1 \leq a_2]s &= \begin{cases} \mathbf{tt}, & \text{si } \mathcal{A}[a_1]s \text{ es menor que } \mathcal{A}[a_2]s \\ \mathbf{ff}, & \text{en otro caso} \end{cases} \\ \mathcal{B}[\neg b]s &= \begin{cases} \mathbf{tt}, & \text{si } \mathcal{B}[b]s \text{ es } \mathbf{ff} \\ \mathbf{ff}, & \text{en otro caso} \end{cases} \\ \mathcal{B}[b_1 \wedge b_2]s &= \begin{cases} \mathbf{tt}, & \text{si } \mathcal{B}[b_1]s \text{ es } \mathbf{tt} \text{ y } \mathcal{B}[b_2]s \text{ es } \mathbf{tt} \\ \mathbf{ff}, & \text{en otro caso} \end{cases} \end{aligned}$$

De nuevo, por inducción estructural, es fácil demostrar el siguiente resultado, que es análogo al que vimos para los numerales:

Proposición 1.4. *La función $\mathcal{B} : \mathbf{Bexp} \rightarrow (\mathbf{State} \rightarrow \mathbf{Bool})$ es total.*

El siguiente ejemplo ilustra cómo podemos extender una categoría sintáctica (de forma cuidadosa):

Ejemplo 1.5. Consideremos la extensión \mathbf{Bexp}' de \mathbf{Bexp} :

$$b ::= \mathbf{true} \mid \mathbf{false} \mid a_1 = a_2 \mid a_1 \neq a_2 \mid a_1 \leq a_2 \mid a_1 \geq a_2 \mid a_1 < a_2 \mid a_1 > a_2 \mid \neg b \mid b_1 \wedge b_2 \mid b_1 \vee b_2 \mid b_1 \Rightarrow b_2 \mid b_1 \Leftrightarrow b_2$$

Dos expresiones booleanas b_1, b_2 se dicen *equivalentes* si, para cada estado s , $\mathcal{B}[b_1]s = \mathcal{B}[b_2]s$. Veamos que, dada una expresión $b' \in \mathbf{Bexp}'$, existe $b \in \mathbf{Bexp}$ equivalente a b' . La demostración consiste en dos pasos: (i) Dar un valor semántico a cada expresión de la extensión, (ii) Comprobar que podemos expresar el valor semántico de b' mediante b , empleando las igualdades sintácticas naturales.

- Si b' es una expresión de \mathbf{Bexp} , $b := b'$.
- Si b' es de la forma $a_1 \neq a_2$, tomamos b como $\neg(a_1 = a_2)$.
- Si b' es de la forma $a_1 \geq a_2$, tomamos b como $a_2 \leq a_1$.
- Si b' es de la forma $a_1 < a_2$, tomamos b como $(a_1 \leq a_2) \wedge \neg(a_1 = a_2)$.
- Si b' es de la forma $a_1 > a_2$, tomamos b como $(a_2 \leq a_1) \wedge \neg(a_1 = a_2)$.
- Si b' es de la forma $b_1 \vee b_2$, tomamos b como $\neg(\neg b_1 \wedge \neg b_2)$.
- Si b' es de la forma $b_1 \Rightarrow b_2$, tomamos b como $\neg(b_1 \wedge \neg b_2)$.
- Si b' es de la forma $b_1 \Leftrightarrow b_2$, tomamos b como $\neg(b_1 \wedge \neg b_2) \wedge \neg(b_2 \wedge \neg b_1)$.

Notemos que podríamos haber razonado inductivamente, pero para mayor claridad hemos indicado cuál es la traducción concreta de cada expresión.

1.5. Propiedades semánticas

En esta sección introducimos dos conceptos fundamentales que son comunes a la lógica.

1.5.1. Variables libres

Dada una expresión aritmética a , su conjunto de *variables libres*, $FV(a) \subseteq \mathbf{Var}$, se define composicionalmente como:

$$\begin{aligned} FV(n) &= \emptyset \\ FV(x) &= \{x\} \\ FV(a_1 + a_2) &= FV(a_1) \cup FV(a_2) \\ FV(a_1 \times a_2) &= FV(a_1) \cup FV(a_2) \\ FV(a_1 - a_2) &= FV(a_1) \cup FV(a_2) \end{aligned}$$

El siguiente resultado nos dice que $FV(a)$ determina el valor semántico de a :

Lema 1.6. *Sea $a \in \mathbf{Aexp}$. Sean $s, s' \in \mathbf{State}$ tales que, para cada $x \in FV(a)$, $s \ x = s' \ x$. Entonces $\mathcal{A}[a]s = \mathcal{A}[a]s'$.*

Demostración. Veamos los casos base:

- Si $a := n$, sabemos que $\mathcal{A}[a]s := \mathcal{N}[n] =: \mathcal{A}[a]s'$.
- Si $a := x$, entonces, como $x \in FV(a)$, por hipótesis tenemos que $\mathcal{A}[a]s := s \ x = s' \ x := \mathcal{A}[a]s'$.

Los casos inductivos son:

- Si a es de la forma $a_1 + a_2$, $\mathcal{A}[a]s := \mathcal{A}[a_1]s + \mathcal{A}[a_2]s$ y $\mathcal{A}[a]s' := \mathcal{A}[a_1]s' + \mathcal{A}[a_2]s'$. Como $FV(a_i) \subseteq FV(a_1) \cup FV(a_2) = FV(a_1 + a_2)$, por la hipótesis de inducción aplicada a a_i , tenemos que $\mathcal{A}[a_i]s = \mathcal{A}[a_i]s'$, para $i = 1, 2$. Entonces,

$$\mathcal{A}[a_1 + a_2]s = \mathcal{A}[a_1]s + \mathcal{A}[a_2]s = \mathcal{A}[a_1]s' + \mathcal{A}[a_2]s' = \mathcal{A}[a_1 + a_2]s',$$

como queríamos.

- Para $a_1 * a_2$ y $a_1 - a_2$ basta repetir lo anterior (ya que el conjunto de variables libres es el mismo). □

De la misma forma, para expresiones booleanas, tenemos:

$$\begin{aligned} FV(\mathbf{true}) &= \emptyset \\ FV(\mathbf{false}) &= \emptyset \\ FV(a_1 = a_2) &= FV(a_1) \cup FV(a_2) \\ FV(a_1 \leq a_2) &= FV(a_1) \cup FV(a_2) \\ FV(\neg b) &= FV(b) \\ FV(b_1 \wedge b_2) &= FV(b_1) \cup FV(b_2) \end{aligned}$$

La demostración del anterior lema se puede repetir de nuevo:

Lema 1.7. *Sea $b \in \mathbf{Bexp}$. Sean $s, s' \in \mathbf{State}$ tales que, para cada $x \in FV(b)$, $s \ x = s' \ x$. Entonces $\mathcal{B}[b]s = \mathcal{B}[b]s'$.*

Demostración. Casos base:

- Si $b := \mathbf{true}$, $\mathcal{B}[b]s := V =: \mathcal{B}[b]s'$ y análogamente con \mathbf{false} .
- Si b es de la forma $a_1 = a_2$, con $a_1, a_2 \in \mathbf{Aexp}$, sabemos que

$$\mathcal{B}[a_1 = a_2]s = \begin{cases} V, & \text{si } \mathcal{A}[a_1]s \text{ es igual a } \mathcal{A}[a_2]s \\ F, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \text{y que } \mathcal{B}[a_1 = a_2]s' = \begin{cases} V, & \text{si } \mathcal{A}[a_1]s' \text{ es igual a } \mathcal{A}[a_2]s' \\ F, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Como suponemos que para cada $x \in FV(b)$, $s \ x = s' \ x$ y $FV(a_1), FV(a_2) \subseteq FV(b)$, se sigue que se verifican las hipótesis del lema anterior, y que por tanto $\mathcal{A}[a_i]s = \mathcal{A}[a_i]s'$, para $i = 1, 2$. Ahora bien, $\mathcal{B}[b]s$ es V si y solo si $\mathcal{A}[a_1]s$ es igual a $\mathcal{A}[a_2]s$ y, por lo que acabamos de decir, esto es cierto si y solo si $\mathcal{A}[a_1]s'$ es igual a $\mathcal{A}[a_2]s'$, que es precisamente equivalente a que $\mathcal{B}[b]s'$ sea V .

- Si b es de la forma $a_1 \leq a_2$, con $a_1, a_2 \in \mathbf{Aexp}$, el procedimiento es análogo al anterior.

Para los casos inductivos tenemos:

- Si b es de la forma $\neg b'$, para cierta $b' \in \mathbf{Bexp}$, sabemos que entonces $\mathbf{FV}(b) = \mathbf{FV}(b')$. Como suponemos que, para cada $x \in \mathbf{FV}(b)$, $s \models x = s' \models x$, podemos aplicar la hipótesis de inducción, y entonces obtenemos que $\mathcal{B}[b]s$ es V si y solo si $\mathcal{B}[b']s = \mathcal{B}[b']s'$ es V , que es equivalente a que $\mathcal{B}[b]s'$ sea V . Por tanto, $\mathcal{B}[b]s = \mathcal{B}[b]s'$.
- Si b es de la forma $b_1 \wedge b_2$, para ciertas $b_1, b_2 \in \mathbf{Bexp}$, sabemos que entonces $\mathbf{FV}(b) = \mathbf{FV}(b_1) \cup \mathbf{FV}(b_2)$ y, siguiendo los razonamientos que ya hemos hecho antes, podemos aplicar la hipótesis de inducción sobre b_1 y b_2 . Entonces $\mathcal{B}[b]s$ es V si y solo si $\mathcal{B}[b_1]s$ es V y $\mathcal{B}[b_2]s$ es v , que equivale a que $\mathcal{B}[b_1]s'$ sea V y $\mathcal{B}[b_2]s'$ sea V , que es cierto si y solo si $\mathcal{B}[b]s'$ es V y, por tanto, $\mathcal{B}[b]s = \mathcal{B}[b]s'$.

□

1.5.2. Sustitución

Si tenemos dos expresiones aritméticas a, a_0 y $x \in \mathbf{FV}(a)$, entonces denotamos por $a[x \mapsto a_0]$ a la expresión obtenida al *sustituir* cada ocurrencia de x en a por a_0 . Se define composicionalmente como:

$$\begin{aligned} n[x \mapsto a_0] &= n \\ y[x \mapsto a_0] &= \begin{cases} a_0, & \text{si } x = y \\ y, & \text{si } x \neq y \end{cases} \\ (a_1 + a_2)[x \mapsto a_0] &= a_1[x \mapsto a_0] + a_2[x \mapsto a_0] \\ (a_1 \times a_2)[x \mapsto a_0] &= a_1[x \mapsto a_0] \times a_2[x \mapsto a_0] \\ (a_1 - a_2)[x \mapsto a_0] &= a_1[x \mapsto a_0] - a_2[x \mapsto a_0] \end{aligned}$$

También podemos definir la sustitución en relación con los estados:

$$(s[y \mapsto v])x := \begin{cases} v, & \text{si } x = y \\ s \models x, & \text{si } x \neq y \end{cases}$$

La relación entre ambos conceptos se muestra en el siguiente resultado:

Lema 1.8. *Dadas $a, a_0 \in \mathbf{Aexp}$, para todo $s \in \mathbf{State}$ se cumple que*

$$\mathcal{A}[a[y \mapsto a_0]]s = \mathcal{A}[a](s[y \mapsto \mathcal{A}[a_0]s]).$$

Demostración. De nuevo, una demostración rutinaria por inducción estructural. Los casos base son los siguientes:

- Si $a := n$, $\mathcal{A}[a[y \mapsto a_0]]s = \mathcal{A}[n]s = \mathcal{N}[n] = \mathcal{A}[a](s[y \mapsto \mathcal{A}[a_0]s])$.
- Si $a := x$, entonces

$$\begin{aligned} \mathcal{A}[a[y \mapsto a_0]]s &= \begin{cases} \mathcal{A}[a_0]s & x = y \\ \mathcal{A}[x]s & x \neq y \end{cases} \\ \mathcal{A}[a](s[y \mapsto \mathcal{A}[a_0]s]) &= (s[y \mapsto \mathcal{A}[a_0]s]) \models x = \begin{cases} \mathcal{A}[a_0]s & x = y \\ s \models x & x \neq y \end{cases} \end{aligned}$$

- Si $a := a_1 + a_2$ con a_1, a_2 cumpliendo la proposición. Se tiene

$$\mathcal{A}[a_i[y \mapsto a_0]]s = \mathcal{A}[a_i](s[y \mapsto \mathcal{A}[a_0]s]) = \mathcal{A}[a_i]s'$$

para $i \in \{1, 2\}$. Se denota $s' := (s[y \mapsto \mathcal{A}[a_0]s])$. Entonces

$$\begin{aligned} \mathcal{A}[(a_1 + a_2)[y \mapsto a_0]]s &= \mathcal{A}[a_1[y \mapsto a_0] + a_2[y \mapsto a_0]]s \\ &= \mathcal{A}[a_1[y \mapsto a_0]]s \oplus \mathcal{A}[a_2[y \mapsto a_0]]s \\ &\stackrel{\text{hip.ind.}}{=} \mathcal{A}[a_1]s' \oplus \mathcal{A}[a_2]s' \\ &= \mathcal{A}[a_1 + a_2]s' \end{aligned}$$

- El caso $a := a_1 \times a_2$ es análogo.

□

En general, si tratamos con conjuntos de variables, necesitaremos lo siguiente. Sea $X \subseteq \mathbf{Var}$ y $s, s' \in \mathbf{State}$. Dada $x \in \mathbf{Var}$, definimos la *sustitución múltiple en X* como:

$$(s'[X \mapsto s])\ x := \begin{cases} s\ x, & \text{si } x \in X \\ s'\ x, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Todo lo anterior justifica una noción que será importante a lo largo del curso. Dada una categoría sintáctica \mathbf{Cat} , dos expresiones $b_1, b_2 \in \mathbf{Cat}$ y una función semántica $\mathcal{C} : \mathbf{Cat} \rightarrow \mathcal{C}$, se dice que b_1, b_2 son *semánticamente equivalentes* si para todo $s \in \mathbf{State}$ se tiene

$$\mathcal{C}[\![b_1]\!]s = \mathcal{C}[\![b_2]\!]s.$$

De todos modos, veremos que esta noción depende en gran medida del conjunto de reglas que empleemos.

2 | Semántica operacional

En el anterior capítulo hemos visto cómo dar un valor semántico al lenguaje While mediante el punto de vista de la semántica denotacional. Centrémonos ahora en la semántica operacional. La distinción fundamental que hacíamos de este enfoque es la siguiente:

- Semántica operacional *natural*, que describe cómo se han obtenido los resultados generales de las ejecuciones.
- Semántica operacional *estructural*, que describe cómo se ha obtenido cada paso en la ejecución.

Para ambos tipos de semántica operacional, el valor semántico de cada expresión será especificado por un *sistema de transiciones*, compuesto de dos configuraciones distintas:

$\langle S, s \rangle$, que denota que la expresión S se ejecutará desde el estado s .

s , que denota un estado terminal. Las *configuraciones terminales* tendrán esta forma.

Finalmente, es necesaria una *relación de transición* que describa cómo tiene lugar la ejecución. La diferencia entre las dos semánticas se encuentra principalmente en ésta. De hecho, veremos que ambos tipos de semántica son, en cierto sentido, equivalentes.

2.1. Semántica operacional natural

2.1.1. Sistema de transiciones

La relación de transición $\langle S, s \rangle \rightarrow s'$ se puede leer como que, la ejecución de S desde el estado s terminará y el nuevo estado será s' . Está determinada por las siguientes reglas¹:

Sistema (While_{ns}).

$[\text{ass}_{\text{ns}}]$

$$\frac{}{\langle x := a, s \rangle \rightarrow s[x \mapsto \mathcal{A}[[a]]s]}$$

$[\text{skip}_{\text{ns}}]$

$$\frac{}{\langle \text{skip}, s \rangle \rightarrow s}$$

$[\text{comp}_{\text{ns}}]$

$$\frac{\langle S_1, s \rangle \rightarrow s' \quad \langle S_2, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle S_1; S_2, s \rangle \rightarrow s''}$$

¹Nótese que las variables S_1, S_2, s, s', s'' , etc. son libres.

$$[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$$

$$\frac{\langle S_1, s \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s = \text{tt}$$

$$[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$$

$$\frac{\langle S_2, s \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s = \text{ff}$$

$$[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$$

$$\frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s' \quad \langle \text{while } b \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s''} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s = \text{tt}$$

$$[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$$

$$\frac{}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s = \text{ff}$$

Aclaremos un poco la terminología:

Definición 2.1. Una *regla* en general tiene la forma general

$$\frac{\langle S_1, s_1 \rangle \rightarrow s'_1 \dots \langle S_n, s_n \rangle \rightarrow s'_n}{\langle S, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } \varphi$$

donde los términos que aparecen encima y bajo la línea son, respectivamente, las *premisas* y la *conclusión*, y donde φ es la *condición*. Cuando empleamos las reglas anteriores para obtener una transición $\langle S, s \rangle \rightarrow s'$, obtenemos un *árbol de derivación*. Una regla sin premisas se llama *axioma*.

Consideremos el problema de construir un árbol de derivación para una expresión S y un estado s . El método general consiste en partir de la ‘raíz’ y encontrar las ‘hojas’, es decir, el paso inicial consiste en buscar una regla de modo que su conclusión tenga la ejecución $\langle S, s \rangle$ en su parte izquierda. Los pasos inductivos son:

- Si la regla encontrada es un axioma, entonces podemos determinar el estado terminal y terminamos.
- Si la regla encontrada no es un axioma, entonces el siguiente paso consiste en buscar un árbol de derivación para sus premisas.

Nótese que, en cada paso, las condiciones para aplicar cada regla tienen que ser verificadas. En el futuro demostraremos algo que parece falso a primera vista: que en el lenguaje While hay a lo sumo un árbol de derivación posible para cada ejecución $\langle S, s \rangle$.

Definición 2.2. Decimos que una ejecución de la expresión S desde el estado s , $\langle S, s \rangle$, *termina* si existe un estado s' tal que $\langle S, s \rangle \rightarrow s'$. Si tal estado no existe entonces decimos que la ejecución *cicla*. Para una expresión S , decimos que *siempre termina* si $\langle S, s \rangle$ termina para cada elección de s y que *siempre cicla* si $\langle S, s \rangle$ cicla para cada elección de s .

Ejemplo 2.3. Podemos tratar de determinar si las siguientes expresiones terminan o ciclan siempre:

1. `while $\neg(x = 1)$ do $(y := y \times x; x := x - 1)$.`
2. `while $1 \leq x$ do $(y := y \times x; x := x - 1)$.`
3. `while true do skip.`

La primera para si se inicializa x con un valor mayor o igual que 1 y cicla en caso contrario: nótese que si $x < 1$ decrecerá continuamente, luego es imposible que la condición del bucle llegue a no cumplirse.

La segunda para siempre. Es parecida a la anterior salvo por el hecho de que la condición del bucle hace que, para $x < 1$, se pare.

La tercera dejaría intacta la configuración inicial. Sin embargo, la ejecución cicla pese a no realizar ninguna acción. Esto es porque la condición del bucle es siempre cierta.

2.1.2. Propiedades

El sistema de transición nos da un entorno en el que estudiar las propiedades de las expresiones. Veamos a continuación una definición precisa de un concepto que introdujimos al final de la introducción:

Definición 2.4. Dos expresiones S_1, S_2 se dicen *semánticamente equivalentes* si para cada par $s, s' \in \mathbf{State}$,

$$\langle S_1, s \rangle \rightarrow s' \text{ si y solo si } \langle S_2, s \rangle \rightarrow s'.$$

Lema 2.5. *while b do S es semánticamente equivalente a $\text{if } b \text{ then } (S; \text{while } b \text{ do } S) \text{ else skip}$.*

Demostración. Dividimos la prueba en dos implicaciones:

Parte 1. Supongamos que se cumple $\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s''$. Entonces existe un árbol de derivación para él, T . T puede tener dos formas en función de la regla que hayamos aplicado: o bien hemos aplicado la regla o el axioma $[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$. Veamos cada caso:

(a) Si hemos aplicado la regla $[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$, T es de la forma:

$$[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{tt}}] \frac{\frac{\dots}{\langle S, s \rangle \rightarrow s'} \quad \frac{\dots}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s''}}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s''}$$

con $\mathcal{B}[b]s = \text{tt}$. Ahora bien, notemos que:

$$[\text{comp}_{\text{ns}}] \frac{\frac{\dots}{\langle S, s \rangle \rightarrow s'} \quad \frac{\dots}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s''}}{\langle S; \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s''}$$

Usando que $\mathcal{B}[b]s = \text{tt}$, podemos aplicar:

$$[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{ff}}] \frac{\langle S; \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{if } b \text{ then } (S; \text{while } b \text{ do } S) \text{ else skip}, s \rangle \rightarrow s''}$$

Y por tanto, $\langle \text{if } b \text{ then } (S; \text{while } b \text{ do } S) \text{ else skip}, s \rangle \rightarrow s''$.

(b) Si hemos aplicado la regla $[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$, T es de la forma:

$$\frac{}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s}$$

es decir, necesariamente $s = s''$ y $\mathcal{B}[b]s = \text{ff}$. Usando el axioma $[\text{skip}_{\text{ns}}]$, directamente obtenemos que

$$[\text{skip}_{\text{ns}}] \frac{}{\langle \text{skip}, s \rangle \rightarrow s''}$$

Pero entonces,

$$[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{ff}}] \frac{\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s \quad \langle \text{skip}, s \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{if } b \text{ then } (S; \text{while } b \text{ do } S) \text{ else skip}, s \rangle \rightarrow s''}$$

y por tanto obtenemos el resultado.

Parte 2. Supongamos ahora que se cumple $\langle \text{if } b \text{ then } (S; \text{while } b \text{ do } S) \text{ else skip}, s \rangle \rightarrow s''$. Entonces, tenemos un árbol de derivación T y, de nuevo, podemos distinguir qué forma tendrá según las reglas que hayamos aplicado:

(a) Si hemos aplicado la regla $[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$, T es de la forma:

$$[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{tt}}] \frac{\overline{\dots} \quad \langle S; \text{while } b \text{ do } s, s \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{if } b \text{ then } (S; \text{while } b \text{ do } S) \text{ else skip}, s \rangle \rightarrow s''}$$

y con $\mathcal{B}[b]s = \text{tt}$. Ahora bien, solo hemos podido obtener la premisa anterior mediante $[\text{comp}_{\text{ns}}]$, por tener una expresión de la forma $S_1; S_2$ en la ejecución. Entonces deducimos que T es:

$$[\text{comp}_{\text{ns}}] \frac{\overline{\dots} \quad \langle S, s \rangle \rightarrow s' \quad \overline{\dots} \quad \langle \text{while } b \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle S; \text{while } b \text{ do } s, s \rangle \rightarrow s''}$$

Pero entonces notemos que, usando la hipótesis $\mathcal{B}[b]s = \text{tt}$:

$$[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{tt}}] \frac{\overline{\dots} \quad \langle S, s \rangle \rightarrow s' \quad \overline{\dots} \quad \langle \text{while } b \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s''}$$

y obtenemos el resultado.

(b) Si hemos usado la regla $[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$, deducimos que $\mathcal{B}[b]s = \text{ff}$ y que por tanto tenemos un árbol de derivación para $\langle \text{skip}, s \rangle \rightarrow s''$ y, por tanto, que $s = s''$. Pero usando $[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$, tenemos el resultado (el razonamiento ha sido análogo al apartado (b) de la Parte 1).

□

Ejemplo 2.6. Veamos que $S_1; (S_2; S_3)$ y $(S_1; S_2); S_3$ son semánticamente equivalentes. Si suponemos que $\langle S_1; (S_2; S_3), s \rangle \rightarrow s'$, entonces es porque en su árbol de derivación hemos empleado $[\text{comp}_{\text{ns}}]$ a las premisas $\langle S_1, s \rangle \rightarrow s''$ y $\langle S_2; S_3, s'' \rangle \rightarrow s'$. A su vez, la segunda premisa proviene del mismo modo de las premisas $\langle S_2, s'' \rangle \rightarrow t$ y $\langle S_3, t \rangle \rightarrow s'$. Es decir, tenemos las siguientes hojas:

(a) $\langle S_1, s \rangle \rightarrow s''$.

(b) $\langle S_2, s'' \rangle \rightarrow t$.

(c) $\langle S_3, t \rangle \rightarrow s'$.

Ahora, combinando (a) y (b) con $[\text{comp}_{\text{ns}}]$, obtenemos $\langle S_1; S_2, s \rangle \rightarrow t$ y, combinando esto con (c) de la misma forma, obtenemos que $\langle (S_1; S_2); S_3, s \rangle \rightarrow s'$, como queríamos ver. La otra implicación es análoga.

Notemos, por otro lado, que en general $S_1; S_2$ y $S_2; S_1$ no son semánticamente equivalentes: si tratásemos de hacer lo mismo que antes, obtendríamos las hojas $\langle S_1, s \rangle \rightarrow s''$ y $\langle S_2, s'' \rangle \rightarrow s'$ por un lado y $\langle S_2, s \rangle \rightarrow s''$ y $\langle S_1, s'' \rangle \rightarrow s'$ por otro, y en general no hay forma de combinar cada par de premisas para obtener la conclusión deseada.

Ejemplo 2.7. Podemos expandir el sistema While_{ns} el siguiente modo: añadimos dos reglas que permitan dar una semántica de la expresión $\text{for } x := a_1 \text{ to } a_2 \text{ do } S$, es decir,

$$[\text{for}_{\text{ns}}^{\text{tt}}] \frac{\langle x := a_1; S, s \rangle \rightarrow s' \quad \langle \text{for } x := x + 1 \text{ to } a_2 \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{for } x := a_1 \text{ to } a_2 \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s''} \quad \text{si } \mathcal{B}[a_1 \leq a_2]s = \text{tt}$$

$$[\text{for}_{\text{ns}}^{\text{ff}}] \frac{}{\langle \text{for } x := a_1 \text{ to } a_2 \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s[x \mapsto \mathcal{A}[a_1]]s} \quad \text{si } \mathcal{B}[a_1 \leq a_2]s = \text{ff}$$

Pero debemos tener un especial cuidado con este tipo de reglas, por ejemplo, podemos descuidar que en a_1 aparezca la variable y , a saber, que a_1 contenga $y + 3$, y que por otro lado en S tengamos $y = 5$. Del mismo modo, podríamos tener que la variable x ya aparece del mismo modo como $x = 4$, por ejemplo. Si x apareciera en a_2 entonces también tendríamos este problema.

Aunque no lo demostraremos, se puede observar que el sistema While_{ns} es *Turing-completo*, es decir, en él podemos simular cualquier computación posible en una máquina de Turing. Por tanto, se podía pensar que podemos introducir reglas para ciertas expresiones en función de su correlato en While_{ns} (que existe, por lo anterior). Sin embargo, si quisiéramos introducir `for $x := a_1$ to a_2 do S` como un bucle `while ... do ...`, acabaríamos teniendo apariciones de `while ... do ...` en las reglas asociadas a `for $x := a_1$ to a_2 do S` , lo que difiere de la semántica operacional que hemos visto hasta ahora.

Ejemplo 2.8. Podríamos extender el lenguaje While con dos reglas para la expresión `repeat S until b` :

$$\begin{array}{c} [\text{repeat}_{\text{ns}}^{\text{tt}}] \quad \frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s' = \text{tt} \\ \\ [\text{repeat}_{\text{ns}}^{\text{ff}}] \quad \frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s' \quad \langle \text{repeat } S \text{ until } b, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \rightarrow s''} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s' = \text{ff} \end{array}$$

Proposición 2.9. Son semánticamente equivalentes:

- `repeat S until b .`
- `S ; if b then skip else (repeat S until b).`

Demostración. Parte 1. Supongamos que $\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \rightarrow s'$. Solo tenemos las siguientes posibilidades:

(a) Si hemos aplicado la regla $[\text{repeat}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$, tenemos:

$$[\text{repeat}_{\text{ns}}^{\text{tt}}] \quad \frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s' = \text{tt}$$

Ahora bien, por otro lado, podemos aplicar el axioma $[\text{skip}_{\text{ns}}]$ para obtener directamente que $\langle \text{skip}, s' \rangle \rightarrow s'$. Ahora, como si $\mathcal{B}[b]s' = \text{tt}$, podemos aplicar la regla $[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$:

$$[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{tt}}] \quad \frac{\langle \text{skip}, s' \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s' \rangle \rightarrow s'}$$

Y, entonces,

$$[\text{comp}_{\text{ns}}] \quad \frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s' \quad \langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s' \rangle \rightarrow s'}{\langle S; \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s \rangle \rightarrow s'}$$

Luego obtenemos el resultado.

(b) Si hemos aplicado la regla $[\text{repeat}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$, tenemos:

$$[\text{repeat}_{\text{ns}}^{\text{ff}}] \quad \frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s'' \quad \langle \text{repeat } S \text{ until } b, s'' \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s' = \text{ff}$$

Ahora, usando que si $\mathcal{B}[b]s' = \text{ff}$,

$$[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{ff}}] \quad \frac{\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s'' \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s'' \rangle \rightarrow s'}$$

Pero entonces,

$$[\text{comp}_{\text{ns}}] \quad \frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s'' \quad \langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s'' \rangle \rightarrow s'}{\langle S; \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s \rangle \rightarrow s'}$$

Parte 2. Supongamos que $\langle S; \text{if } b \text{ then skip else repeat } S \text{ until } b, s \rangle \rightarrow s'$. La única posibilidad es haber aplicado la regla $[\text{comp}_{\text{ns}}]$

$$\frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s_0 \quad \langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s_0 \rangle \rightarrow s'}{\langle S; \text{if } b \text{ then skip else repeat } S \text{ until } b, s \rangle \rightarrow s'}$$

para algún $s_0 \in \mathbf{State}$. Para la transición $\langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s_0 \rangle \rightarrow s'$ tenemos dos posibilidades

(a) Si $\mathcal{B}[b]_{s_0} = \mathbf{tt}$ entonces únicamente existe la posibilidad de que se haya derivado de $[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$:

$$\frac{\langle \text{skip}, s_0 \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s_0 \rangle \rightarrow s'}$$

y la única forma de que sea cierto $\langle \text{skip}, s_0 \rangle \rightarrow s'$ es que $s_0 = s'$. Como se verifica $\langle S, s \rangle \rightarrow s_0$ entonces se verifica $\langle S, s \rangle \rightarrow s'$ y se puede aplicar la regla $[\text{repeat}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$:

$$\frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \rightarrow s'}$$

obteniendo el resultado pues ya se sabe que $\langle S, s \rangle \rightarrow s_0$.

(b) Si $\mathcal{B}[b]_{s_0} = \mathbf{ff}$ entonces solo cabe la posibilidad de que haya partido de $[\text{if}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$:

$$\frac{\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s_0 \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s_0 \rangle \rightarrow s'}$$

teniendo así $\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s_0 \rangle \rightarrow s'$ y entonces se puede deducir

$$\frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s_0 \quad \langle \text{repeat } S \text{ until } b, s_0 \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \rightarrow s'}$$

mediante $[\text{repeat}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$ pues $\mathcal{B}[b]_{s_0} = \mathbf{ff}$. □

Para poder demostrar que una propiedad como la anterior se verifica en árboles sencillos y compuestos, emplearemos la demostración por *inducción sobre reglas*, que se compone de dos pasos:

1. Primero comprobamos que la propiedad se verifica para los axiomas del sistema.
2. Para cada regla, suponiendo que las premisas verifican la propiedad, comprobamos que también se cumple para la conclusión (siempre y cuando se verifiquen las condiciones de la regla).

El siguiente resultado nos dice que, en general, hay *una* manera de deducir una configuración mediante las reglas del sistema de transición While_{ns} :

Teorema 2.10. *El sistema de transiciones While_{ns} es determinista, es decir, para cada $S \in \mathbf{Stm}$, $s, s', s'' \in \mathbf{State}$,*

$$\langle S, s \rangle \rightarrow s' \text{ y } \langle S, s \rangle \rightarrow s'' \text{ implica que } s' = s''.$$

Demostración. Para simplificar la demostración, vamos a definir una propiedad sintáctica de las reglas del sistema While_{ns} . Decimos que dos reglas son *independientes entre sí* cuando no es posible obtener una mediante la aplicación de la otra. Notemos que este es el caso de nuestro sistema: las reglas $[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$ y $[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$ son independientes entre sí porque ambas tienen premisas distintas (suponemos que \mathbf{tt} y \mathbf{ff} son distintos). Entonces, como cada regla es independiente de la otra (y evidentemente, cada regla es determinista), deducimos que, en caso de que tengamos $\langle S, s \rangle \rightarrow s'$ y $\langle S, s \rangle \rightarrow s''$, necesariamente tendremos que haber aplicado la misma única regla posible en los dos casos para llegar a las respectivas configuraciones. Es fácil convencerse entonces de que, por inducción sobre las reglas, la propiedad deseada se cumple². □

Ejemplo 2.11. Podemos añadir una semántica **forVar** x **do** S que ejecute la sentencia S siempre que x sea distinto de 0 y lo incremente en 1 en cada iteración. Veamos que sería semánticamente equivalente a **while** $\neg(x = 0)$ **do** $(S; x := x + 1)$.

Primero, definimos la semántica de **forVar** x **do** S :

²Obviamente, esa demostración no es intercambiable con la demostración formal por inducción estructural. Podría demostrarse el caso general del que hemos hablado, a saber, formalizando lo que significa precisamente la independencia de dos reglas.

$$\begin{array}{c}
[\text{for}^0] \frac{}{\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s} \text{ si } \mathcal{A}[x]s = 0 \\
[\text{for}^{\neq 0}] \frac{\langle S; x := x + 1, s \rangle \rightarrow s' \quad \langle \text{forVar } x \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s_1}{\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s_1} \text{ si } \mathcal{A}[x]s \neq 0
\end{array}$$

Veamos que $\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s_1$ implica $\langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s \rangle \rightarrow s_1$.

Para empezar, sabemos que $\mathcal{A}[x]s = 0$ si y solo si $\mathcal{B}[\neg(x = 0)]s = \mathbf{ff}$, dividimos la demostración en dos pasos:

1. Si $x = 0$ tenemos por $[\text{for}^0]$ que:

$$\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s$$

Como $\mathcal{B}[\neg(x = 0)]s = \mathbf{ff}$ por la regla $[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$ sabemos que:

$$\langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s \rangle \rightarrow s$$

2. Si $x \neq 0$, entonces suponemos ciertas las siguientes premisas:

- a) $\langle S; x := x + 1, s \rangle \rightarrow s_2$
- b) $\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s_2 \rangle \rightarrow s'$

pues la transición $\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s'$ solo puede haber provenido de:

$$[\text{for}^{\neq 0}] \frac{\langle S; x := x + 1, s \rangle \rightarrow s_2 \quad \langle \text{forVar } x \text{ do } S, s_2 \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s'}$$

Podemos aplicar la hipótesis de inducción sobre $\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s_2 \rangle \rightarrow s'$ y por lo tanto tenemos que $\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s_2 \rangle \rightarrow s'$ implica que $\langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s_2 \rangle \rightarrow s'$, luego podemos construir el siguiente árbol de derivación:

$$[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{tt}}] \frac{\langle S; x := x + 1, s \rangle \rightarrow s_2 \quad \langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s_2 \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s \rangle \rightarrow s'}$$

Supongamos ahora que $\langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s \rangle \rightarrow s'$. Entonces, distinguimos los siguientes casos:

1. Si hemos aplicado $[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$, entonces

$$[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{ff}}] \frac{}{\langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s \rangle \rightarrow s'}$$

y además deducimos que $s = s'$ y que $x \neq 0$. Pero entonces tenemos que, directamente:

$$[\text{for}^0] \frac{}{\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s}$$

es decir, obtenemos la implicación deseada.

2. Si hemos aplicado $[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{tt}}]$,

$$[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{tt}}] \frac{\langle (S; x := x + 1), s \rangle \rightarrow s' \quad \langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s' \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s \rangle \rightarrow s''}$$

y además deducimos que $x \neq 0$. Si aplicamos hipótesis de inducción sobre $\langle \text{while } \neg(x = 0) \text{ do } (S; x := x + 1), s' \rangle \rightarrow s''$, obtenemos que $\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s''$. Pero entonces, juntando las premisas anteriores,

$$[\text{for}^{\neq 0}] \frac{\langle S; x := x + 1, s \rangle \rightarrow s' \quad \langle \text{forVar } x \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{forVar } x \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s''}$$

luego obtenemos el resultado.

2.1.3. Expresiones

Finalmente, podemos definir el valor semántico de cada $S \in \mathbf{Stm}$ mediante una aplicación $\mathcal{S}_{\text{ns}} : \mathbf{Stm} \rightarrow (\mathbf{State} \hookrightarrow \mathbf{State})$, donde

$$\mathcal{S}_{\text{ns}}[[S]] : \mathbf{State} \hookrightarrow \mathbf{State}$$

$$s \mapsto \begin{cases} s', & \text{si } \langle S, s \rangle \rightarrow s' \\ \text{indefinido,} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

El determinismo de While_{ns} implica que está bien definida. Además, es parcial porque, como vimos, la expresión **while true do skip** siempre entra en bucle, es decir, $\mathcal{S}_{\text{ns}}[[\text{while true do skip}]]s = \text{indefinido}$, para cada $s \in \mathbf{State}$.

Ejemplo 2.12. Podemos definir, por ejemplo, una semántica de paso largo para **Aexp** mediante la relación de transición $\langle a, s \rangle \rightarrow_A z$, donde $\langle a, s \rangle$ significa que $a \in \mathbf{Aexp}$ se evalúa en $s \in \mathbf{State}$ y $z \in \mathbb{Z}$ es un estado final:

Sistema ($\mathbf{Aexp}_{\text{ns}}$).

$$\frac{}{\langle n, s \rangle \rightarrow_A \mathcal{N}[[n]]} \quad \text{si } n \in \mathbf{Num}$$

$$\frac{}{\langle x, s \rangle \rightarrow_A sx} \quad \text{si } x \in \mathbf{Var}$$

$$\frac{\langle a_1, s \rangle \rightarrow_A z_1 \quad \langle a_2, s \rangle \rightarrow_A z_2}{\langle a_1 \text{ op } a_2, s \rangle \rightarrow_A z_1 * z_2}$$

donde **op** se refiere a \oplus, \ominus, \otimes y $*$ a $+, -, \times$.

Proposición 2.13. Sean $a \in \mathbf{Aexp}$, $s \in \mathbf{State}$, $z \in \mathbb{Z}$. Entonces $\langle a, s \rangle \rightarrow_A z$ si y solo si $\mathcal{A}[[a]]s = z$.

Demostración. La demostración es por inducción estructural. Los casos base son:

- Si $a = n$, entonces $\langle a, s \rangle \rightarrow_A \mathcal{N}[[n]] = \mathcal{A}[[n]]s$.
- Si $a = x$, entonces $\langle a, s \rangle \rightarrow_A sx = \mathcal{A}[[x]]s$.

Resumimos los casos inductivos en:

- Si $a = a_1 \text{ op } a_2$, entonces, empleando la última regla de $\mathbf{Aexp}_{\text{ns}}$, tenemos que $\langle a_i, s \rangle \rightarrow_A z_i$ si y solo si (por hipótesis de inducción) $\mathcal{A}[[a_i]]s = z_i$, con $i = 1, 2$. Pero entonces sabemos que $\mathcal{A}[[a_1 \text{ op } a_2]]s = \mathcal{A}[[a_1]]s * \mathcal{A}[[a_2]]s = z_1 * z_2 = z$.

□

Ejemplo 2.14. Siguiendo el ejemplo anterior, podemos definir un sistema de transiciones para expresiones booleanas como sigue. Definimos $\langle b, s \rangle \rightarrow_B X$, donde $\langle b, s \rangle$ indica que b se evalúa en el estado s y donde $X \in \mathbf{Bool}$.

Sistema ($\mathbf{Bexp}_{\text{ns}}$).

$$\frac{}{\langle \text{true}, s \rangle \rightarrow_B \mathbf{tt}}$$

$$\frac{}{\langle \text{false}, s \rangle \rightarrow_B \mathbf{ff}}$$

$$\frac{\langle a_1, s \rangle \rightarrow_A z_1 \quad \langle a_2, s \rangle \rightarrow_A z_2}{\langle a_1 = a_2, s \rangle \rightarrow_A X}$$

donde X es el booleano correspondiente (véase la definición de $\mathcal{B}[[\cdot]]$).

$$\frac{\langle a_1, s \rangle \rightarrow_A z_1 \quad \langle a_2, s \rangle \rightarrow_A z_2}{\langle a_1 \leq sa_2, s \rangle \rightarrow_A X}$$

donde X es el booleano correspondiente (de nuevo, empleando la definición de $\mathcal{B}[\cdot]$).

$$\frac{\langle a_1, s \rangle \rightarrow_A z_1 \quad \langle a_2, s \rangle \rightarrow_A z_2}{\langle a_1 \leq sa_2, s \rangle \rightarrow_A X}$$

donde X es el booleano correspondiente.

$$\frac{\langle b, s \rangle \rightarrow_B X}{\langle \neg b, s \rangle \rightarrow_B X'}$$

donde X' es el booleano correspondiente (negación de X).

$$\frac{\langle b_1, s \rangle \rightarrow_B X \quad \langle b_2, s \rangle \rightarrow_B Y}{\langle b_1 \wedge b_2, s \rangle \rightarrow_B Z}$$

donde Z es el booleano correspondiente (conjunción de X e Y).

El siguiente resultado es análogo al último que dimos antes:

Proposición 2.15. Sean $b \in \mathbf{Bexp}$, $s \in \mathbf{State}$ y $X \in \mathbf{Bool}$. Entonces $\langle b, s \rangle \rightarrow_B X$ si y solo si $\mathcal{B}[b]s = X$.

Demostración. Por inducción estructural. Véase la demostración del anterior teorema y la definición de $\mathcal{B}[\cdot]$. La demostración es análoga. \square

2.2. Semántica operacional estructural

2.2.1. Sistema de transiciones

Ahora nos centramos en los pasos concretos de la ejecución de un programa. Para ello, definimos una relación de transición $\langle S, s \rangle \Rightarrow \gamma$ como:

- Si γ es de la forma $\langle S', s' \rangle$, entonces la ejecución de S desde s no se completa y sigue en $\langle S', s' \rangle$.
- Si γ es de la forma s' , entonces la ejecución finaliza en el estado s' .

La nueva relación de transición queda determinada por el conjunto de reglas:

Sistema ($\text{While}_{\text{sos}}$).

$[\text{ass}_{\text{sos}}]$

$$\frac{}{\langle x := a, s \rangle \Rightarrow s[x \mapsto \mathcal{A}[a]s]}$$

$[\text{skip}_{\text{sos}}]$

$$\frac{}{\langle \text{skip}, s \rangle \Rightarrow s}$$

$[\text{comp}_{\text{sos}}^1]$

$$\frac{\langle S_1, s \rangle \Rightarrow \langle S'_1, s' \rangle}{\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S'_1; S_2, s' \rangle}$$

$[\text{comp}_{\text{sos}}^2]$

$$\frac{\langle S_1, s \rangle \Rightarrow s'}{\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S_2, s' \rangle}$$

$[\text{if}_{\text{sos}}^{\text{tt}}]$

$$\frac{}{\langle \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S_1, s \rangle} \text{ si } \mathcal{B}[\![b]\!]s = \text{tt}$$

$[\text{if}_{\text{sos}}^{\text{ff}}]$

$$\frac{}{\langle \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2; s, s \rangle \Rightarrow \langle S_2, s \rangle} \text{ si } \mathcal{B}[\![b]\!]s = \text{ff}$$

$[\text{while}_{\text{sos}}]$

$$\frac{}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \Rightarrow \langle \text{if } b \text{ then } (S; \text{while } b \text{ do } S) \text{ else skip}, s \rangle}$$

Notemos que podríamos haber incluido, por ejemplo, dos reglas para la semántica de `while b do S`:

$$[\text{while}_{\text{sos}}^{\text{ff}}] \frac{}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \Rightarrow s} \text{ si } \mathcal{B}[\![s]\!] = \text{ff}$$

y

$$[\text{while}_{\text{sos}}^{\text{tt}}] \frac{}{\langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \Rightarrow \langle S; \text{while } b \text{ do } S, s \rangle} \text{ si } \mathcal{B}[\![s]\!] = \text{tt}$$

Definición 2.16. Se dirá que $\langle S, s \rangle$ está *bloqueada* si no existe γ tal que $\langle S, s \rangle \Rightarrow \gamma$. Una secuencia de derivación es finita cuando llega a un bloqueo o a un estado final:

$$\gamma_0 \Rightarrow \gamma_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow \gamma_k$$

donde $\gamma_0 = \langle S, s \rangle$, $\gamma_i \Rightarrow \gamma_{i+1}$ para $i \in \{0, \dots, k-1\}$ y γ_k es una configuración bloqueada.

Normalmente escribiremos $\gamma_0 \Rightarrow^i \gamma$ si hay i pasos en la ejecución de γ_0 a γ . Si hay finitos pasos, denotamos $\gamma_0 \Rightarrow^* \gamma$. $\gamma_0 \Rightarrow^i \gamma$ y $\gamma_0 \Rightarrow^* \gamma$ no tiene por qué ser secuencias de derivación, solo si γ es configuración final o de bloqueo.

Definición 2.17. La ejecución $\langle S, s \rangle$ de la expresión S en un estado s :

1. *Termina* si existe una única secuencia de derivación finita comenzando en $\langle S, s \rangle$.
2. *Termina con éxito* si $\langle S_1, s \rangle \Rightarrow^* s'$ para algún estado s' .
3. *Cicla* si existe una secuencia de derivación infinita comenzando en $\langle S, s \rangle$.

Nótese que estas definiciones son mutuamente excluyentes si y solo si las secuencias de derivación son únicas. Por comodidad, las definimos de este modo porque, si extendemos el lenguaje, no nos tendremos que preocupar.

Ejemplo 2.18. Supongamos que queremos extender $\text{While}_{\text{sos}}$ con la expresión `repeat S until b`. Podemos añadir la regla:

$$[\text{repeat}_{\text{sos}}] \frac{}{\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \Rightarrow \langle S; \text{if } b \text{ then skip else } (\text{repeat } S \text{ until } b), s \rangle}$$

La idea es que la expresión `repeat S until b` sea equivalente a `S; while ¬b do S`. Se definirá posteriormente el concepto de equivalencia semántica y se demostrará este resultado.

2.2.2. Propiedades

El método de demostración principal consiste en hacer *inducción sobre la longitud de las secuencias de derivación* (finitas) que se estudian, es decir, si queremos demostrar una propiedad acerca de nuestro sistema de transiciones:

- Demostramos que la propiedad se cumple para secuencias de derivación de longitud 0 (en ocasiones nos encontraremos que se cumple la propiedad de forma vacía).
- Demostramos que si la propiedad se cumple para secuencias de longitud (a lo sumo) k , entonces se cumple para secuencias de longitud $k + 1$.

A modo de ejemplo de este método, veamos el siguiente resultado:

Lema 2.19. Si $\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow^k s''$, entonces existen $s' \in \mathbf{State}$, $k_1, k_2 \in \mathbb{N}$ tales que $k = k_1 + k_2$ y

$$\langle S_1, s \rangle \Rightarrow^{k_1} s' \quad \text{y} \quad \langle S_2, s' \rangle \Rightarrow^{k_2} s''.$$

Demostración. Si $k = 0$, entonces $\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow^0 s''$ implica (vacuamente) el resultado, porque $\langle S_1; S_2, s \rangle$ y s'' son distintos. Supongamos que el resultado se cumple para longitudes menores o iguales que k . Veamos que se sigue para $k + 1$. Por tanto, tenemos la premisa $\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow^{k+1} s''$, es decir, que existe una configuración γ tal que

$$\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow \gamma \Rightarrow^k s''$$

Por tanto, distinguimos dos casos según la regla que hemos aplicado a $\langle S_1; S_2, s \rangle$ para llegar a γ :

- (a) Si hemos aplicado $[\text{comp}_{\text{sos}}^1]$, tenemos que

$$[\text{comp}_{\text{sos}}^1] \frac{\langle S_1, s \rangle \Rightarrow \langle S'_1, s' \rangle}{\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S'_1; S_2, s' \rangle = \gamma}$$

luego $\langle S'_1; S_2, s' \rangle \Rightarrow^k s''$. Entonces, como esta derivación es de longitud k , podemos aplicar hipótesis de inducción, esto es, existen $s_0 \in \mathbf{State}$ y $k_1, k_2 \in \mathbb{N}$ con $k = k_1 + k_2$ y

$$\langle S'_1, s' \rangle \Rightarrow^{k_1} s_0 \quad \text{y} \quad \langle S_2, s_0 \rangle \Rightarrow^{k_2} s''.$$

Ahora bien, como tenemos la premisa $\langle S_1, s \rangle \Rightarrow \langle S'_1, s' \rangle$ y $\langle S'_1, s' \rangle \Rightarrow^{k_1} s_0$, entonces tenemos que $\langle S_1, s \rangle \Rightarrow^{k_1+1} s_0$. Por otro lado, también tenemos $\langle S_2, s_0 \rangle \Rightarrow^{k_2} s''$ y que $(k_1 + 1) + k_2 = (k_1 + k_2) + 1 = k + 1$. Es decir, hemos obtenido la conclusión deseada. Por tanto, hemos probado el resultado para este caso.

- (b) Si hemos aplicado $[\text{comp}_{\text{sos}}^2]$, tenemos que

$$[\text{comp}_{\text{sos}}^2] \frac{\langle S_1, s \rangle \Rightarrow s'}{\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S_2, s' \rangle = \gamma}$$

Entonces deducimos que $\langle S_2, s' \rangle \Rightarrow^k s''$. Simplemente tomando $k_1 := 1$ y $k_2 := k$ vemos que $k_1 + k_2 = k + 1$ y que tenemos el resultado. □

Ejemplo 2.20. Por otro lado, $\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow^* \langle S_2, s' \rangle$ no implica necesariamente que $\langle S_1, s \rangle \Rightarrow^* s'$. Por ejemplo, podemos tomar $S_1 := \text{skip}$, $S_2 := \text{while } \neg(x = 1) \text{ do } x := x + 1 \text{ y } sx = 3$, $s'x = s[x \mapsto 2]$.

El siguiente lema viene a decir que la ejecución de una expresión es independiente de cualquier enunciado que se ejecute después:

Lema 2.21. Si $\langle S_1, s \rangle \Rightarrow^k s'$, entonces $\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow^k \langle S_2, s' \rangle$.

Demostración. Por inducción sobre la longitud de las derivaciones. En caso de $k = 0$, la premisa es falsa y el resultado se tiene directamente. Supongamos que se cumple el resultado para longitudes $\leq k$ y veámoslo para $k + 1$. Nuestra suposición es que $\langle S_1, s \rangle \Rightarrow^{k+1} s'$. Entonces tenemos que hay cierta configuración γ con

$$\langle S_1, s \rangle \Rightarrow \gamma \Rightarrow^k s'$$

y además, notemos que $\gamma = \langle S, s'' \rangle$ porque $k \leq 1$. Pero entonces, aplicando la hipótesis de inducción a $\langle S, s'' \rangle \Rightarrow^k s'$, tenemos que $\langle S; S_2, s'' \rangle \Rightarrow^k \langle S_2, s' \rangle$.

Por otro lado, de $\langle S_1, s \rangle \Rightarrow \langle S, s'' \rangle$ podemos deducir que:

$$[\text{comp}_{\text{sos}}^1] \frac{\langle S_1, s \rangle \Rightarrow \langle S, s'' \rangle}{\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S; S_2, s'' \rangle}$$

Es decir, sabemos que $\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S; S_2, s'' \rangle$ y que $\langle S; S_2, s'' \rangle \Rightarrow^k \langle S_2, s' \rangle$. Basta componer ambas derivaciones para ver que $\langle S_1; S_2, s \rangle \Rightarrow^{k+1} \langle S_2, s' \rangle$, como queríamos. \square

Teorema 2.22. *El sistema de transiciones $\text{While}_{\text{sos}}$ es determinista, es decir, para cualesquiera S, s, γ, γ' tenemos que*

$$\langle S, s \rangle \Rightarrow \gamma \text{ y } \langle S, s \rangle \Rightarrow \gamma' \text{ implica que } \gamma = \gamma'$$

Demostración. Véase la demostración del Teorema 2.10. \square

Definición 2.23. Dos expresiones S_1, S_2 se dicen *semánticamente equivalentes* si, para cada $s \in \mathbf{State}$,

- Si γ es estado final o bloqueado, entonces $\langle S_1, s \rangle \Rightarrow^* \gamma$ si y solo si $\langle S_2, s \rangle \Rightarrow^* \gamma$. Nótese que las longitudes de las derivaciones no tienen por qué coincidir.
- La³ secuencia de derivación empezando en $\langle S_1, s \rangle$ es infinita si y solo si lo es la que empieza en $\langle S_2, s \rangle$.

Ejemplo 2.24. Veamos que S y $S; \text{skip}$ son semánticamente equivalentes. Supongamos que $\langle S, s \rangle \Rightarrow^* s'$, es decir, existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $\langle S, s \rangle \Rightarrow^k s'$. Entonces, el Lema 2.21 nos dice que dado $\langle S, s \rangle \Rightarrow^k s'$ se tiene

$$\langle S; \text{skip}, s \rangle \Rightarrow^k \langle \text{skip}, s' \rangle$$

Por la regla $[\text{skip}_{\text{sos}}]$ se deduce $\langle \text{skip}, s' \rangle \Rightarrow s'$ y entonces

$$\langle S; \text{skip}, s \rangle \Rightarrow^* s'$$

Supongamos ahora que $\langle S; \text{skip}, s \rangle \Rightarrow^* s''$, entonces existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $\langle S; \text{skip}, s \rangle \Rightarrow^k s''$. Por el Lema 2.19 se tiene la existencia de $s' \in \mathbf{State}$ y $k_1, k_2 \in \mathbb{N}$ tal que $k = k_1 + k_2$ y

$$\langle S, s \rangle \Rightarrow^{k_1} s' \text{ y } \langle \text{skip}, s' \rangle \Rightarrow^{k_2} s''$$

La secuencia $\langle \text{skip}, s' \rangle \Rightarrow^{k_2} s''$ es cierta si y solo si $k_2 = 1$ y $s' = s''$ pues solo se puede aplicar $[\text{skip}_{\text{sos}}]$, se deduce entonces

$$\langle S, s \rangle \Rightarrow^{k_1} s''$$

es decir, $\langle S, s \rangle \Rightarrow^* s''$.

Ejemplo 2.25. Definimos en 2.18 la sentencia **repeat** S **until** b y dejamos por hacer la demostración de su equivalencia con $S; \text{while } \neg b \text{ do } S$. Hay que probar que para cada $s, s' \in \mathbf{State}$ sucede que

$$\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \Rightarrow^* s' \iff \langle S; \text{while } \neg b \text{ do } S, s \rangle \Rightarrow^* s'$$

\implies) Supongamos que

$$\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \Rightarrow^* s'$$

Sabemos por la regla $[\text{repeat}_{\text{sos}}]$

$$\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s \rangle \Rightarrow^* s' \implies \langle S; \text{if } b \text{ then skip else } (\text{repeat } S \text{ until } b), s \rangle \Rightarrow^* s'$$

³La unicidad viene dada por el determinismo de $\text{While}_{\text{sos}}$.

y por el lema 2.19 existen $k_1, k_2 \in \mathbb{N}$ tal que

$$\langle S, s \rangle \Rightarrow^{k_1} s''$$

y

$$\langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s'' \rangle \Rightarrow^{k_2} s'$$

Dividimos en casos en función del valor booleano de b :

- $\mathcal{B}[b]s'' = \mathbf{tt}$. Usando el axioma $[\text{if}_{\text{sos}}^{\text{tt}}]$ seguido de $[\text{skip}_{\text{sos}}]$ se tiene

$$\begin{array}{ccc} \langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s'' \rangle & \xRightarrow{[\text{if}_{\text{sos}}^{\text{tt}}]} & \langle \text{skip}, s'' \rangle \\ & \xRightarrow{[\text{skip}_{\text{sos}}]} & s'' \end{array}$$

de lo que se deduce, por determinismo, que $s' = s''$. Desarrollemos ahora $\langle S; \text{ while } \neg b \text{ do } S, s \rangle$. Por el lema 2.21, como sabemos que $\langle S, s \rangle \Rightarrow^{k_1} s''$, deducimos que

$$\langle S; \text{ while } \neg b \text{ do } S, s \rangle \Rightarrow^{k_1} \langle \text{while } \neg b \text{ do } S, s'' \rangle$$

Aplicando $[\text{while}_{\text{sos}}]$ deducimos $\langle \text{if } \neg b \text{ then } S; \text{ while } \neg b \text{ do } S \text{ else skip}, s'' \rangle$ y como $\mathcal{B}[\neg b] = \mathbf{ff}$ entonces

$$\begin{array}{ccc} \langle \text{if } \neg b \text{ then } S; \text{ while } \neg b \text{ do } S \text{ else skip}, s'' \rangle & \xRightarrow{[\text{if}_{\text{sos}}^{\text{ff}}]} & \langle \text{skip}, s'' \rangle \\ & \xRightarrow{[\text{skip}_{\text{sos}}]} & s'' \end{array}$$

concluyendo que $\langle S; \text{ while } \neg b \text{ do } S, s \rangle \Rightarrow^* s'$, como queríamos probar.

- $\mathcal{B}[b]s'' = \mathbf{ff}$. Aplicando $[\text{if}_{\text{ff}}]$ se tiene

$$\langle \text{if } b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s'' \rangle \xRightarrow{[\text{if}_{\text{ff}}]} \langle \text{repeat } S \text{ until } b, s'' \rangle$$

y esta última sentencia $\Rightarrow^* s'$, por determinismo. Por hipótesis de inducción se deduce de

$$\langle \text{repeat } S \text{ until } b, s'' \rangle \Rightarrow^* s'$$

que

$$\langle S; \text{ while } \neg b \text{ do } S, s'' \rangle \Rightarrow^* s'$$

y por el lema 2.21 y aplicando $[\text{while}_{\text{sos}}]$

$$\langle S; \text{ while } \neg b \text{ do } S, s \rangle \Rightarrow^* \langle \text{while } \neg b \text{ do } S, s'' \rangle \Rightarrow \langle \text{if } \neg b \text{ then } S; \text{ while } \neg b \text{ do } S \text{ else skip}, s'' \rangle$$

Dado que $\mathcal{B}[\neg b]s'' = \mathbf{tt}$ se tiene

$$\langle \text{if } \neg b \text{ then } S; \text{ while } \neg b \text{ do } S \text{ else skip}, s'' \rangle \Rightarrow \langle S; \text{ while } \neg b \text{ do } S, s'' \rangle \Rightarrow^* s'$$

concluyendo el resultado $\langle S; \text{ while } \neg b \text{ do } S, s \rangle \Rightarrow^* s'$.

\Leftarrow) Suponemos $\langle S; \text{ while } \neg b \text{ do } S, s \rangle \Rightarrow^* s'$. Nuevamente por el lema 2.19 se tienen $k_1, k_2 \in \mathbb{N}$ y $s'' \in \text{tal}$ que

$$\langle S, s \rangle \Rightarrow^{k_1} s'' \quad y \quad \langle \text{while } \neg b \text{ do } S, s'' \rangle \Rightarrow^{k_2} s'$$

De $[\text{while}_{\text{sos}}]$ se tiene

$$\langle \text{while } \neg b \text{ do } S, s'' \rangle \Rightarrow \langle \text{if } \neg b \text{ then } S; \text{ while } \neg b \text{ do } S \text{ else skip}, s'' \rangle$$

Se divide en casos según $\mathcal{B}[b]s''$:

- Si $\mathcal{B}[b]s'' = \mathbf{tt}$ ($\mathcal{B}[\neg b]s'' = \mathbf{ff}$) entonces se aplica $[\mathbf{if}_{\text{sos}}^{\mathbf{ff}}]$ y $[\mathbf{skip}_{\text{sos}}]$ para deducir

$$\langle \mathbf{if} \neg b \text{ then } S; \text{ while } \neg b \text{ do } S \text{ else skip}, s'' \rangle \Rightarrow \langle \mathbf{skip}, s'' \rangle \Rightarrow s''$$

y como $\langle \text{while } \neg b \text{ do } S, s'' \rangle \Rightarrow_1^k s'$, por determinismo debe suceder $s' = s''$. Veamos que la sentencia del **repeat** lleva al estado s' . Aplicamos la regla $[\mathbf{repeat}_{\text{sos}}]$ para obtener

$$\langle \mathbf{repeat} S \text{ until } b, s \rangle \Rightarrow \langle S; \mathbf{if} b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s \rangle$$

Ahora como $\langle S, s \rangle \Rightarrow^{k_1} s''$ aplicando el lema 2.21 se consigue que

$$\langle S; \mathbf{if} b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s \rangle \Rightarrow^{k_1} \langle \mathbf{if} b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s'' \rangle$$

Y ahora como $\mathcal{B}[b]s'' = \mathbf{tt}$ se consigue mediante $[\mathbf{if}_{\text{sos}}^{\mathbf{tt}}]$ y $[\mathbf{skip}_{\text{sos}}]$

$$\langle \mathbf{if} b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s'' \rangle \Rightarrow \langle \mathbf{skip}, s'' \rangle \Rightarrow s''$$

Dado que $s' = s''$ se consigue finalmente

$$\langle \mathbf{repeat} S \text{ until } b, s \rangle \Rightarrow^* s'$$

- Si $\mathcal{B}[b]s'' = \mathbf{ff}$ ($\mathcal{B}[\neg b]s'' = \mathbf{tt}$) entonces toca aplicar la regla $[\mathbf{if}_{\text{sos}}^{\mathbf{tt}}]$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{if} \neg b \text{ then } S; \text{ while } \neg b \text{ do } S \text{ else skip}, s'' \rangle &\Rightarrow \langle S; \text{while } \neg b \text{ do } S, s'' \rangle \\ &\Rightarrow^* s' \end{aligned}$$

Donde en el último paso se ha aplicado determinismo. Volvemos a aplicar lo mismo de antes para el **repeat**

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{repeat} S \text{ until } b, s \rangle &\xRightarrow{[\mathbf{repeat}_{\text{sos}}]} \langle S; \mathbf{if} b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s \rangle \\ &\xRightarrow{2.21} \langle \mathbf{if} b \text{ then skip else (repeat } S \text{ until } b), s'' \rangle \\ &\xRightarrow{[\mathbf{if}_{\text{sos}}^{\mathbf{ff}}]} \langle \mathbf{repeat} S \text{ until } b, s'' \rangle \end{aligned}$$

Por hipótesis de inducción se tiene que

$$\langle \mathbf{repeat} S \text{ until } b, s'' \rangle \Rightarrow^* s' \iff \langle S; \text{while } \neg b \text{ do } S, s'' \rangle \Rightarrow^* s'$$

de donde se deduce que $\langle \mathbf{repeat} S \text{ until } b, s'' \rangle \Rightarrow^* s'$ y finalmente

$$\langle \mathbf{repeat} S \text{ until } b, s \rangle \Rightarrow^* s'$$

2.2.3. Expresiones

Análogamente a como hicimos en la semántica de paso largo, podemos definir el valor semántico de las expresiones mediante una función parcial $\mathcal{S}_{\text{sos}} : \mathbf{Stm} \rightarrow (\mathbf{State} \hookrightarrow \mathbf{State})$, donde

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{\text{sos}}[[S]] : \mathbf{State} &\hookrightarrow \mathbf{State} \\ s &\mapsto \begin{cases} s', & \text{si } \langle S, s \rangle \Rightarrow^* s' \\ \text{indefinido,} & \text{en otro caso} \end{cases} \end{aligned}$$

Notemos que esta función está bien definida precisamente por el determinismo que vimos en el anterior apartado. La ejecución de $\langle S, s \rangle$ para una expresión S dada una configuración inicial $s \in \mathbf{State}$ puede dar lugar a tres casos

- Que termine, y entonces existe $s' \in \mathbf{State}$ tal que

$$s \in \mathbf{State} \Rightarrow^* s'$$

y entonces $\mathcal{S}_{\text{sos}}[[S]]s = s'$

- Que se quede bloqueada, y entonces no queda otra que $\mathcal{S}_{\text{sos}}[[S]]s = \text{indefinido}$.
- Que cicle, ocurriendo nuevamente que $\mathcal{S}_{\text{sos}}[[S]]s = \text{indefinido}$.

La equivalencia semántica coincide \mathcal{S}_{sos} en el sentido de la siguiente proposición:

Proposición 2.26. *Si S_1 y S_2 son semánticamente equivalente entonces*

$$\mathcal{S}_{\text{sos}}[[S_1]] = \mathcal{S}_{\text{sos}}[[S_2]]$$

Demostración. Hay que probarlo particularizando en cada $s \in \mathbf{State}$

Supongamos que S_1 y S_2 son semánticamente equivalentes. Se distinguen dos casos

- Existe un estado final $s' \in \mathbf{State}$ tal que

$$\langle S_1, s \rangle \Rightarrow^* s' \text{ y } \langle S_2, s \rangle \Rightarrow^* s'$$

y trivialmente

$$\mathcal{S}_{\text{sos}}[[S_1]]s = s' = \mathcal{S}_{\text{sos}}[[S_2]]s$$

- Ambas secuencias son infinitas, es decir

$$\langle S_1, s \rangle \text{ es infinita si y solo si } \langle S_2, s \rangle \text{ es infinita}$$

y entonces

$$\mathcal{S}_{\text{sos}}[[S_1]]s = \text{indefinido} = \mathcal{S}_{\text{sos}}[[S_2]]s$$

□

La implicación contraria no es cierta, pues si S_1 es una sentencia que cicla y S_2 es una sentencia que se bloquea, $\mathcal{S}_{\text{sos}}[[S_1]] = \text{indefinido} = \mathcal{S}_{\text{sos}}[[S_2]]$ pero S_1 y S_2 no son semánticamente equivalentes.

2.3. Teorema de equivalencia

Hasta ahora hemos presentado por separado los dos sistemas de transiciones para While, y hemos visto que tienen comportamientos, en general, distintos. Sin embargo, si vemos la semántica de paso largo como una extensión de la de paso corto, podemos convencernos que son esencialmente los mismo. De hecho, tienen el mismo poder expresivo. Más precisamente, el resultado clave de esta sección es:

Teorema 2.27. *Consideremos el lenguaje While. Para cada $S \in \mathbf{Stm}$, $\mathcal{S}_{\text{ns}}[[S]] = \mathcal{S}_{\text{sos}}[[S]]$.*

Demostración. La demostración se divide en dos pasos, cada uno consiste en demostrar uno de los siguientes lemas:

- Para cada $S \in \mathbf{Stm}$, dados $s, s' \in \mathbf{State}$, $\langle S, s \rangle \rightarrow s'$ implica que $\langle S, s \rangle \Rightarrow^* s'$.
Se demuestra por inducción en los árboles de derivación.
- Para cada $S \in \mathbf{Stm}$, dados $s, s' \in \mathbf{State}$ y $k \in \mathbb{N}$, $\langle S, s \rangle \Rightarrow^k s'$ implica que $\langle S, s \rangle \rightarrow s'$.
Se demuestra por inducción en la longitud de las secuencias de derivación.

Entonces, dados $S \in \mathbf{Stm}$, $s \in \mathbf{State}$, por los dos lemas se tiene que $\mathcal{S}_{\text{ns}}[[S]] = s'$ si y solo si $\mathcal{S}_{\text{sos}}[[S]] = s'$. Pero entonces obtenemos que, si una de las dos funciones está definida en un estado o no, la otra lo estará también y coincidirá con ella o no estará definida, respectivamente. Es decir, ambas funciones coinciden. □

3 | Más semántica operacional

La elección de una semántica operacional u otra para el lenguaje While es, por el Teorema de equivalencia, arbitraria. En cambio, para otros lenguajes puede ocurrir que una aproximación sea natural y la otra completamente impracticable. En esta sección estudiaremos una serie de conceptos que mostrarán la debilidad de las semánticas que hemos visto hasta ahora.

3.1. Construcciones no secuenciales

3.1.1. abort

La intención que tenemos al introducir la expresión **abort** es la siguiente: queremos que, cuando se ejecute, pare la ejecución de todo el programa. Notemos que no podríamos, a simple vista, construir una expresión con el mismo comportamiento en While. A saber, **while true do skip** solo consigue hacer un bucle, y **skip** permite que un programa se pueda ejecutar más tarde. Entonces, la sintaxis de las expresiones (o sentencias) queda del siguiente modo:

$$S ::= x := a \mid \text{skip} \mid S_1; S_2 \mid \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2 \mid \text{while } b \text{ do } S \mid \text{abort}$$

Por otro lado, aunque debemos modificar ahora el comportamiento de las relaciones de transición que vimos en el anterior capítulo, no es necesario alterar los sistemas de transiciones asociados, porque tan solo queremos que cualquier configuración de la forma $\langle \text{abort}, s \rangle$ quede atascada, y esto no modifica el comportamiento de (las reglas asociadas a) las otras expresiones. Es decir, la expresión **abort** no necesita de ninguna regla que determine su interpretación.

Ahora bien, no es cierto que While_{ns} y $\text{While}_{\text{sos}}$ se comporten, en general, del mismo modo. De hecho, **abort** distingue entre ambos sistemas de semántica operacional. Esto se debe a que en While_{ns} solo nos interesan las ejecuciones que terminan correctamente y por tanto no distinguimos entre bucles o configuraciones atascadas, mientras que en $\text{While}_{\text{sos}}$ podemos definir bucles (secuencias de derivación infinitas) y ejecuciones que terminan incorrectamente (secuencias de derivación finitas que terminan en una configuración atascada). Así, aunque **abort** no sea semánticamente equivalente a **skip** en While_{ns} , sí que lo es **while true do skip**. Por otro lado, vemos que **abort** no puede ser semánticamente equivalente en $\text{While}_{\text{sos}}$ a **while true do skip**, porque a partir de $\langle \text{while true do skip}, s \rangle$ hay una secuencia de derivación infinita y a partir de $\langle \text{abort}, s \rangle$ no. Tampoco puede serlo **skip**, porque $\langle \text{skip}, s \rangle \Rightarrow s$ es la única secuencia de derivación posible empezando en **skip** y $\langle \text{abort}, s \rangle$ es la correspondiente a **abort**.

Ejemplo 3.1. Podemos extender While con la expresión **assert b before S** . La idea es que, si b es cierto, entonces ejecutamos S y, si es falso, entonces la ejecución del programa se aborta. Para semántica operacional natural bastaría incluir la regla

$$\frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{assert } b \text{ before}, s \rangle \rightarrow s'} \text{ si } \mathcal{B}[b]s = \text{tt}$$

y análogamente para la semántica operacional estructural

$$\frac{}{\langle \text{assert } b \text{ before}, s \rangle \Rightarrow \langle S, s \rangle} \text{ si } \mathcal{B}[b]s = \text{tt}$$

Como se ha mencionado anteriormente no se añade ninguna regla para el caso $\mathcal{B}[b]s = \mathbf{ff}$ pues la idea es que en esta situación actúe como un **abort**.

3.1.2. or

Otra posible extensión de las expresiones de While consiste en añadir nuevas posibilidades de ejecución, es decir, forzar un tipo de no determinismo. Para ello incluimos la expresión **or**:

$$S ::= x := a \mid \mathbf{skip} \mid S_1; S_2 \mid \mathbf{if} \ b \ \mathbf{then} \ S_1 \ \mathbf{else} \ S_2 \mid \mathbf{while} \ b \ \mathbf{do} \ S \mid S_1 \ \mathbf{or} \ S_2$$

Así, si por ejemplos ejecutamos $x := 1 \ \mathbf{or} \ x := 2$, entonces generamos dos caminos distintos: uno en el que x pasa a tener el valor 1 y otro en el que toma el valor 2. Como siempre, en caso de que sea preciso, emplearemos paréntesis para indicar de manera precisa las distintas opciones.

A diferencia de la expresión **abort**, debemos distinguir la nueva ampliación de While en función de cada semántica operacional:

Sistema (While_{ns} con **or**). A las reglas de While_{ns} añadimos:

$$\begin{aligned} [\text{or}_{\text{ns}}^1] \frac{\langle S_1, s \rangle \rightarrow s'}{\langle S_1 \ \mathbf{or} \ S_2, s \rangle \rightarrow s'} \\ [\text{or}_{\text{ns}}^2] \frac{\langle S_2, s \rangle \rightarrow s'}{\langle S_1 \ \mathbf{or} \ S_2, s \rangle \rightarrow s'} \end{aligned}$$

Sistema ($\text{While}_{\text{sos}}$ con **or**). A las reglas de $\text{While}_{\text{sos}}$ añadimos:

$$\begin{aligned} [\text{or}_{\text{sos}}^1] \frac{}{\langle S_1 \ \mathbf{or} \ S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S_1, s \rangle} \\ [\text{or}_{\text{sos}}^2] \frac{}{\langle S_1 \ \mathbf{or} \ S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S_2, s \rangle} \end{aligned}$$

De nuevo, como cabía esperar, ambos sistemas de transiciones funcionan de maneras distintas respecto del no determinismo que hemos introducido. En el caso de While_{ns} tenemos que el no determinismo omite la posibilidad de que haya bucles infinitos, mientras que en $\text{While}_{\text{sos}}$ esto no ocurre. Recurramos al ejemplo de antes.

En While_{ns} , a la configuración $\langle x := 1 \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle$ corresponden dos árboles de derivación, cada uno asociado a las siguientes transiciones:

$$\begin{aligned} \langle x := 1 \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle &\rightarrow s[x \mapsto 1] \\ \langle x := 1 \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle &\rightarrow s[x \mapsto 2] \end{aligned}$$

Además, si tuviésemos $\langle (\mathbf{while} \ \mathbf{true} \ \mathbf{do} \ \mathbf{skip}) \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle$, entonces solo habría un árbol de derivación posible, a saber, el que no corresponde al bucle, es decir,

$$\langle (\mathbf{while} \ \mathbf{true} \ \mathbf{do} \ \mathbf{skip}) \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle \rightarrow s[x \mapsto 2]$$

En cambio, en $\text{While}_{\text{sos}}$, las secuencias de derivación para $\langle x := 1 \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle$ serían

$$\begin{aligned} \langle x := 1 \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle &\Rightarrow^* s[x \mapsto 1] \\ \langle x := 1 \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle &\Rightarrow^* s[x \mapsto 2] \end{aligned}$$

y para $\langle (\mathbf{while} \ \mathbf{true} \ \mathbf{do} \ \mathbf{skip}) \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle$,

$$\langle (\mathbf{while} \ \mathbf{true} \ \mathbf{do} \ \mathbf{skip}) \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle \Rightarrow^* s[x \mapsto 2]$$

$$\langle (\mathbf{while} \ \mathbf{true} \ \mathbf{do} \ \mathbf{skip}) \ \mathbf{or} \ x := 2, s \rangle \Rightarrow \langle \mathbf{while} \ \mathbf{true} \ \mathbf{do} \ \mathbf{skip}, s \rangle \Rightarrow \dots$$

de donde se deduce lo que dijimos arriba.

Ejemplo 3.2. Podemos extender While con la expresión **random(x)**. [HACER ESTO]

3.1.3. par

Una manera de profundizar en el no determinismo que vimos antes consiste en que, por ejemplo, se dé la posibilidad de ejecutar dos expresiones, pero no de forma excluyente, es decir, que ambas ejecuciones se puedan ejecutar intercalándose. Esta es la idea detrás de la expresión **par**:

$$S ::= x := a \mid \text{skip} \mid S_1; S_2 \mid \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2 \mid \text{while } b \text{ do } S \mid S_1 \text{ par } S_2$$

En un caso sencillo como $x := 1 \text{ par } x := 2$, tenemos solo los resultados posibles 1 y 2, correspondientes a ejecutar primero $x := 1$ y después $x := 2$ y viceversa. Si por ejemplo tuviésemos $x := 1 \text{ par } (x := 2; x := x + 2)$, entonces habría tres posibles resultados:

- Si ejecutamos $x := 1$ y luego $x := 2; x := x + 2$, obtenemos 4.
- Si ejecutamos $x := 2; x := x + 2$ y luego $x := 1$, obtenemos 1.
- Si ejecutamos $x := 2$, después $x := 1$ y por último $x := x + 2$, obtenemos 3.

Veamos cómo queda el lenguaje While ampliado con esta nueva expresión. En el caso de $\text{While}_{\text{sos}}$ tenemos:

Sistema ($\text{While}_{\text{sos}}$ con **par**). A las reglas de $\text{While}_{\text{sos}}$ añadimos¹:

$$\begin{aligned} [\text{par}_{\text{sos}}^1] & \frac{\langle S_1, s \rangle \Rightarrow \langle S'_1, s' \rangle}{\langle S_1 \text{ par } S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S'_1 \text{ par } S_2, s' \rangle} \\ [\text{par}_{\text{sos}}^2] & \frac{\langle S_1, s \rangle \Rightarrow s'}{\langle S_1 \text{ par } S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S_2, s' \rangle} \\ [\text{par}_{\text{sos}}^3] & \frac{\langle S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S'_2, s' \rangle}{\langle S_1 \text{ par } S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S_1 \text{ par } S'_2, s' \rangle} \\ [\text{par}_{\text{sos}}^4] & \frac{\langle S_2, s \rangle \Rightarrow s'}{\langle S_1 \text{ par } S_2, s \rangle \Rightarrow \langle S_1, s' \rangle} \end{aligned}$$

Si intentásemos ampliar While_{ns} de la misma manera, podríamos comenzar escribiendo las siguientes reglas:

$$\begin{aligned} & \frac{\langle S_2, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle S_1 \text{ par } S_2, s \rangle \rightarrow \langle S_1, s'' \rangle} \\ & \frac{\langle S_1, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle S_1 \text{ par } S_2, s \rangle \rightarrow \langle S_1, s'' \rangle} \end{aligned}$$

Pero entonces observamos que estas reglas únicamente expresan que S_1 se ejecuta antes o después de S_2 , es decir, no parecen traducir correctamente el valor semántico que tenemos en mente para **par**. Esto se debe a que en While_{ns} nos interesa solo el desarrollo general de la ejecución y, por tanto, la ejecución de una expresión no se puede descomponer en ejecuciones intermedias.

Ejemplo 3.3. Podemos desarrollar una sentencia que fuerce a que un conjunto de sentencias se ejecute de forma atómica. Por ejemplo

$$(x := 1) \text{ par } (x := 2; x := x + 2)$$

podría ejecutarse hasta de 3 formas, pudiendo intercalar las sentencias de la derecha. Para evitarlo podemos forzar a que la segunda parte se ejecute de forma atómica. Se define la sintaxis para **protect**

$$\text{protect } S \text{ end}$$

Para la semántica operacional natural se podría definir su semántica como

¹Se hace notar que las reglas no son mutuamente excluyentes, es decir, podemos aplicar distintas reglas indistintamente, como hemos visto en los ejemplos anteriores.

$$[\text{protect}_{\text{ns}}] \frac{\langle S, s \rangle \rightarrow s'}{\langle \text{protect } S \text{ end}, s \rangle \rightarrow s'}$$

aunque sería algo ambiguo pues en While_{ns} no es posible realizar paralelismo, como mencionamos anteriormente.

Sí se puede definir análogamente para la semántica estructural:

$$[\text{protect}_{\text{sos}}] \frac{\langle S, s \rangle \Rightarrow^* s'}{\langle \text{protect } S \text{ end}, s \rangle \Rightarrow s'}$$

Se toma la premisa $\langle S, s \rangle \Rightarrow^* s'$ para resaltar el estado final de S . Nótese que se utiliza el asterisco para recalcar que ésta puede darse en una cantidad de pasos superior a uno.

3.2. Bloques y declaración de variables

Si bien en la anterior sección introdujimos nuevas expresiones que capturaran nuevos tipos de ejecuciones, lo que nos interesa ahora es añadir entornos para variables y procedimientos locales.

3.2.1. Bloques y declaraciones simples

La primera extensión de While que consideraremos es el lenguaje Block . Éste consiste en la siguiente extensión de la sintaxis de las expresiones de While :

$$S ::= x := a \mid \text{skip} \mid S_1; S_2 \mid \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2 \mid \text{while } b \text{ do } S \mid \text{begin } D_V \ S \text{ end}$$

donde D_V es una metavariable de la nueva categoría sintáctica \mathbf{Dec}_V de *declaraciones de variables*:

$$D_V ::= \text{var } x := a; D_V \mid \varepsilon$$

siendo ε la *declaración vacía*. El conjunto de todas las variables declaradas en D_V , $DVar(D_V)$, se define como sigue:

$$DVar(\varepsilon) := \emptyset, \quad DVar(\text{var } x := a; D_V) := \{x\} \cup DVar(D_V)$$

Queremos que esta nueva clase de expresiones se interprete como la ejecución de otra expresión cualquiera bajo la declaración de variables de D_V , y que éstas variables vuelvan al estado anterior después de finalizar. Es decir, la idea es que las variables declaradas dentro del *bloque* $\text{begin } D_V \ S \text{ end}$ sean *locales*, a diferencia de las que quedan fuera, que llamamos *globales*.

Ejemplo 3.4. Consideremos la expresión

$$\text{begin var } y := 1; (x := 1; \text{begin var } x := 2; y := x + 1 \text{ end}; x := x + y) \text{ end}$$

El símbolo x en $y := x + 1$ se refiere a la variable local introducida en $\text{var } x := 2$, mientras que en $x := x + y$ se refiere a la variable global x en $x := 1$. La variable y es global. Por tanto, $y := x + 1$ nos da el valor $2 + 1 = 3$ para y , en $x := x + y$, x toma el valor $1 + 3 = 4$.

Nos podemos centrar en ampliar While_{ns} (hacerlo con $\text{While}_{\text{sos}}$ es considerablemente más difícil). Tendremos que distinguir un sistema de transiciones para cada una de las dos categorías sintácticas que hemos introducido antes. Las configuraciones asociadas a \mathbf{Dec}_V son del tipo $\langle D_V, s \rangle$ o s , con el significado usual, y denotamos por $\langle D_V, s \rangle \rightarrow_D s'$ a la función de transición asociada. Entonces tenemos:

Sistema (Block_{ns}). A las reglas de While_{ns} añadimos:

$$[\text{var}_{\text{ns}}] \frac{\langle D_V, s[x \rightarrow \mathcal{A}[a]] \rangle \rightarrow_D s'}{\langle \text{var } x := a; D_V, s \rangle \rightarrow_D s'}$$

$$[\text{none}_{\text{ns}}] \frac{}{\langle \varepsilon, s \rangle \rightarrow_D s}$$

$$[\text{block}_{\text{ns}}] \frac{\langle D_V, s \rangle \rightarrow_D s' \quad \langle S, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{begin } D_V \ S \text{ end}, s \rangle \rightarrow s'' [\text{DV}(D_v) \mapsto s]}$$

Fijémonos en que el objetivo de la última regla es ejecutar primero la sentencia S con la declaración de variables local D_V y que, después, aquellas variables dentro de D_V vuelvan al estado previo al **begin**².

Ejemplo 3.5. Podríamos crear una función (sintáctica) que permita sustituir las expresiones de **Dec_V** por otras de **Stm**:

$$\begin{aligned} \delta : \text{Dec}_V &\longrightarrow \text{Stm} \\ \text{var } x := a; D_V &\mapsto x := a; \delta(D_V) \\ \varepsilon &\mapsto \text{skip} \end{aligned}$$

Entonces podríamos reinterpretar las reglas empleando la semántica que ya conocemos para While_{ns} . Por ejemplo, la regla block_{bs} podría expresarse como:

$$\frac{\langle \delta(D_V), s \rangle \rightarrow s' \quad \langle S, s' \rangle \rightarrow s''}{\langle \text{begin } D_V \ S \text{ end}, s \rangle \rightarrow s'' [\text{DVar}(D_V) \mapsto s]}$$

es decir, sin emplear la transición \rightarrow_D . Las otras dos reglas se seguirían de las que ya vimos en While_{ns} .

3.2.2. Procedimientos

En gran parte de los lenguajes de programación, ciertos conjuntos de instrucciones se repiten constantemente. Esto motiva el siguiente concepto: un *procedimiento* será un conjunto de sentencias a las cuales les damos un nombre para, cuando queramos ejecutarlas de nuevo, solamente debamos invocar tal nombre. Hay varias razones prácticas para hacer esto.

Para formalizar esta idea, consideramos una ampliación de **Block**, **Proc**:

$$\begin{aligned} S &::= x := a \mid \text{skip} \mid S_1; S_2 \mid \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2 \mid \text{while } b \text{ do } S \mid \\ &\quad \text{begin } D_V \ D_P \ S \text{ end} \mid \text{call } p \\ D_V &::= \text{var } x := a; D_V \mid \varepsilon \\ D_P &::= \text{proc } p \text{ is } S; D_P \mid \varepsilon \end{aligned}$$

donde $p \in \mathbf{Pname}$ es la categoría sintáctica de los *nombres de procedimientos* y $D_P \in \mathbf{Dec}_P$ es la de *declaraciones de procedimientos*. Notemos que hemos modificado **begin** y se ha añadido la sentencia **call**. $\varepsilon \in \mathbf{Dec}_P$ es la *declaración vacía*.

Para las variables hemos utilizado **State** para guardar sus valores. Se hace más complicado replicar lo mismo para los procesos. Además hemos utilizado en la sentencia **begin** la idea de variables locales y globales, según estuvieran definidas dentro de la sentencia **begin** o no. Ampliaremos este concepto para hablar de variables y procedimientos según el entorno en el que estén definidos. Por ejemplo, una función generalmente modifica variables internamente sin cambiar su valor fuera de ellas. Por tanto, como ya hicimos con las variables, distinguimos entre procedimientos *locales* y *globales*. Los nombres de las variables y los procedimientos, según el entorno en el que estén, se referirán a cosas diferentes. Vamos a distinguir dos tipos de declaración de variables y procedimientos: el *ámbito dinámico* y el *estático*. Según los apliquemos a un tipo u otro de datos, tenemos las siguientes posibilidades:

- Ámbito dinámico para variables y procedimientos
- Ámbito dinámico para variables y estático para procedimientos.
- Ámbito estático para variables y procedimientos.

²Véase la sección 1.5.2 para la definición de sustitución múltiple.

A ellas nos dedicaremos en los siguientes apartados.

Ejemplo 3.6. Sea la expresión³:

```
begin var x:= 0;
  proc p is x:= x*2;
  proc q is call p;
  begin var x:=5;
    proc p is x := x+1;
    call q; y:=x
  end
end
```

Imaginemos cada **begin** como una altura de un árbol. El proceso **p** está definido en dos profundidades: en la primera (línea 2) significa multiplicar por dos y en la segunda (línea 5) significa sumar 1 a la variable **x**. El procedimiento **q** estaría definido únicamente a profundidad 1.

Para hacernos a la idea, en un ámbito estático aquello definido a profundidad n tomará como referencias internas solamente cosas a profundidad $\leq n$, independientemente de que se ejecute a una profundidad mayor. En un ámbito dinámico utilizará las últimas según a qué profundidad se haya ejecutado. Veamos el ejemplo con las distintas casuísticas:

- Si se utiliza **ámbito estático para variables y procedimientos** la sentencia **call q** (profundidad 2) hará referencia a la **q** definida en la línea 3. Este procedimiento está definido a la profundidad 1, por lo que la referencia interna de la **p** que utilizará solo podrá estar a profundidad menor o igual. Es decir, en la invocación de **q** se referirá a la **p** de la línea 2 y no a la de la línea 5 (pues esta última está definida a profundidad 2).

Es decir, la ejecución de **q** se toma a profundidad 2, pero hace referencia a un procedimiento a profundidad 1, luego no puede utilizar internamente la definición de **p** creada en la línea 5. Cuando el ámbito es estático la referencia se fija en tiempo de compilación y no de ejecución.

Como el ámbito es estático también para variables, la invocación de la **p** definida en la segunda línea se referirá a la variable $x := 0$ definida en el primer **begin** (sin alterar, de esta forma, el valor de la x del segundo **begin**).

En conclusión, el estado final en este caso será de $x := 0$ (se multiplica por dos, pero quedaría igual). De la misma forma, la variable y definida localmente en el segundo **begin** se quedará con el valor de 5, pues la x local no se modifica.

- Supongamos que se utiliza **ámbito estático para procedimientos y dinámico para variables**. Como ocurría antes la invocación de **q** en la línea 6 hará referencia a la **p** de la segunda línea. Sin embargo, dado que ahora estamos suponiendo un ámbito dinámico para variables, la referencia a x dentro de **p** será la última que esté disponible en tiempo de ejecución (es decir, aunque **p** venga dado a profundidad 1, como se ejecuta realmente a profundidad 2, podrá utilizar las variables a esta altura, pues es dinámico). Entonces la variable que se modificará será $x := 5$, definida en la línea 4, y la multiplicará por 2, quedando localmente $x = 10$ e $y = x = 10$. La variable x de profundidad 1 se quedará tal cual estaba.
- Si se da el caso en el que **procedimientos y variables están en ámbito dinámico** la invocación de **q** hará referencia a la última **p** referenciada en ejecución (es decir, la de la línea 5). A su vez, este procedimiento hará referencia a la última definición de la variable x . Quedará $x = 5 + 1 = 6$ e $y = 6$ localmente, con la variable $x = 0$ a profundidad 1.

³Para mayor comodidad, empezaremos a escribir las expresiones como pseudocódigo.

3.2.3. Ámbito dinámico para variables y procedimientos

Como hemos visto en el anterior ejemplo, la idea es que, para ejecutar `call p`, debemos ejecutar todo el procedimiento, es decir, tenemos que identificar cada procedimiento con su nombre. Para ello, definimos un *entorno de procedimiento*, que es una aplicación $env_P \in \mathbf{Env}_P := \mathbf{Pname} \hookrightarrow \mathbf{Stm}$, es decir, que nos lleva cada nombre de procedimiento a tal procedimiento.

Comencemos extendiendo While_{ns} con tal entorno. Debemos extender ahora las transiciones $\langle S, s \rangle \rightarrow s'$ usuales. Mediante la notación

$$env_P \vdash \langle S, s \rangle \rightarrow s'$$

nos referimos a que podemos acceder al entorno y por tanto hacer uso de los procedimientos declarados correspondientes, es decir, dado un entorno de procedimientos, hay una transición usual entre dos estados. Por otro lado, reflexionemos sobre el significado de `begin D_V D_P S end`: queremos interpretarla para que, al ejecutar S , tengamos disponibles los procedimientos declarados en D_P . Para ello es necesario actualizar el entorno que hemos definido. Más concretamente, se define una aplicación que define recursivamente un entorno para procedimientos como $\text{upd}_P : \mathbf{Dec}_P \times \mathbf{Env}_P \rightarrow \mathbf{Env}_P$ dada por

$$\begin{aligned} \text{upd}_P(\text{proc } p \text{ is } S; D_P, env_P) &:= \text{upd}_P(D_P, env_P[p \mapsto S]) \\ \text{upd}_P(\varepsilon, env_P) &:= env_P \end{aligned}$$

Por tanto, las reglas de Proc quedan como:

Sistema (Proc, ámbito dinámico para variables y procedimientos).

[ass_{ns}]

$$\frac{}{env_P \vdash \langle x := a, s \rangle \rightarrow s[x \mapsto \mathcal{A}[a]s]}$$

[skip_{ns}]

$$\frac{}{env_P \vdash \langle \text{skip}, s \rangle \rightarrow s}$$

[comp_{ns}]

$$\frac{env_P \vdash \langle S_1, s \rangle \rightarrow s' \quad env_P \vdash \langle S_2, s' \rangle \rightarrow s''}{env_P \vdash \langle S_1; S_2, s \rangle \rightarrow s''}$$

[if_{ns}^{tt}]

$$\frac{env_P \vdash \langle S_1, s \rangle \rightarrow s'}{env_P \vdash \langle \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s = \text{tt}$$

[if_{ns}^{ff}]

$$\frac{env_P \vdash \langle S_2, s \rangle \rightarrow s'}{env_P \vdash \langle \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s = \text{ff}$$

[while_{ns}^{tt}]

$$\frac{env_P \vdash \langle S, s \rangle \rightarrow s' \quad env_P \vdash \langle \text{while } b \text{ do } S, s' \rangle \rightarrow s''}{env_P \vdash \langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s''} \quad \text{si } \mathcal{B}[b]s = \text{tt}$$

$$[\text{while}_{\text{ns}}^{\text{ff}}]$$

$$\frac{}{env_P \vdash \langle \text{while } b \text{ do } S, s \rangle \rightarrow s} \quad \text{si } \mathcal{B}[[b]]s = \text{ff}$$

$$[\text{block}_{\text{ns}}]$$

$$[\text{block}_{\text{ns}}] \frac{\langle D_V, s \rangle \rightarrow_D s' \quad \text{upd}_P(D_P, env_P) \vdash \langle S, s' \rangle \rightarrow s''}{env_P \vdash \langle \text{begin } D_V \ S \ \text{end}, s \rangle \rightarrow s''[\text{DV}(D_v) \mapsto s]}$$

$$[\text{call}_{\text{ns}}^{\text{rec}}]$$

$$\frac{env_P \vdash \langle S, s \rangle \rightarrow s'}{env_P \vdash \langle \text{call } p, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } env_P(p) = S$$

Notemos que las variables no deben en principio acceder al entorno de procedimientos, luego no es necesario modificar las transiciones del tipo $\langle D_V, s \rangle \rightarrow_D s'$ que ya vimos en Block. Es importante notar que permitimos que los procedimientos sean recursivos y que, si llamamos a un procedimiento inexistente, entonces el programa abortará.

3.2.4. Ámbito estático para procedimientos

Para modificar Block siguiendo este enfoque, debemos asegurarnos que cada procedimiento que llamemos sea capaz de ‘recordar’ los procedimientos que ya se habían introducido antes de que fuese declarado. Intuitivamente, debemos asociar cada nombre con el procedimiento al que se refiere, junto con el entorno de procedimientos que había en el momento de declararlo. La manera formal de hacer ésto consiste en extender env_P como una función de $\mathbf{Env}_P := \mathbf{Pname} \hookrightarrow \mathbf{Stm} \times \mathbf{Env}_P$. Este tipo está bien definido, precisamente porque definiremos el entorno de cada procedimiento en función de otros menores, hasta llegar al *entorno de procedimientos vacío*:

$$\begin{aligned} \text{udp}_P(\text{proc } p \text{ is } S; D_P, env_P) &:= \text{udp}_P(D_P, env_P[p \mapsto (S, env_P)]) \\ \text{udp}_P(\varepsilon, env_P) &:= env_P \end{aligned}$$

Tampoco tendremos que cambiar esta vez las declaraciones de variables. Solo tenemos que cambiar las reglas para llamadas de procedimientos. Tenemos dos casos:

- Si asumimos que los procedimientos de Proc son no recursivos, entonces solo tenemos que conocer el entorno del procedimiento para determinarlo junto con su entorno en el momento de la declaración.
- Si asumimos que los procedimientos de Proc son recursivos, tenemos que asegurar que las apariciones de $\text{call } p$ en el cuerpo de p se refieren al procedimiento mismo, es decir, debemos modificar el entorno del procedimiento para que contenga tal información.

Por tanto, tenemos:

Sistema (Proc, ámbito estático para procedimientos no recursivos). En las reglas de Proc, intercambiamos $[\text{call}_{\text{ns}}^{\text{rec}}]$ por:

$$[\text{call}_{\text{ns}}] \frac{env'_P \vdash \langle S, s \rangle \rightarrow s'}{env_P \vdash \langle \text{call } p, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } env_P(p) = (S, env'_P)$$

Y

Sistema (Proc, ámbito estático para procedimientos recursivos). En las reglas de Proc, intercambiamos $[\text{call}_{\text{ns}}^{\text{rec}}]$ por⁴:

$$[\text{call}_{\text{ns}}^{\text{rec}}] \frac{env'_P[p \mapsto (S, env'_P)] \vdash \langle S, s \rangle \rightarrow s'}{env_P \vdash \langle \text{call } p, s \rangle \rightarrow s'} \quad \text{si } env_P(p) = (S, env'_P)$$

⁴Por env'_P nos referimos a otra metavariable distinta de env_P . Podríamos haber escogido letras como nombres, pero env_P nos recuerda inmediatamente lo que simboliza.

3.2.5. Ámbito estático para variables y procedimientos

Ahora, siguiendo las modificaciones que acabamos de ver, debemos cambiar el funcionamiento de los estados. Es decir, reemplazaremos los estados con dos aplicaciones. La primera consiste en un *entorno de variable*, que lleva cada variable en una *ubicación*, $env_V \in \mathbf{Env}_V : \mathbf{Var} \rightarrow \mathbf{Loc}$. Conviene pensar en las ubicaciones como celdas en una memoria abstracta que se van rellorando con datos.

El siguiente tipo de aplicación, llamada *función de almacenamiento*, asocia cada ubicación con un entero, $sto \in \mathbf{Store} : \mathbf{Loc} \cup \{\mathbf{next}\} \rightarrow \mathbb{Z}$, donde \mathbf{next} es una expresión que sirve para guardar un valor en la siguiente ubicación libre. Para que ésto quede bien formalizado, necesitamos, finalmente, $new : \mathbf{Loc} \rightarrow \mathbf{Loc}$, que lleva cada ubicación en la siguiente que esté vacía. Para *actualizar* el entorno de variable y la función de almacenamiento, empleamos las declaraciones de variables.

Nosotros tomaremos $\mathbf{Loc} := \mathbb{Z}$, es decir, iremos asociando variables a ubicaciones etiquetadas con enteros. Por tanto, en nuestro caso, la aplicación new es simplemente la función sucesor. Aunque sean el mismo conjunto, denotaremos el tipo de las ubicaciones como \mathbf{Loc} y a los enteros de la forma usual para mayor claridad.

Dijimos que queríamos reemplazar los estados con estas dos aplicaciones que hemos definido. La forma de hacerlo es la siguiente: $s := sto \circ env_V$. De este modo, tenemos que:

- Para *determinar* el valor de $x \in \mathbf{Var}$, debemos determinar primero una ubicación $l := env_V(x)$ y después un valor $sto(l) \in \mathbb{Z}$.
- Para *asignar* un valor $v \in \mathbb{Z}$ a $x \in \mathbf{Var}$, debemos determinar primero la ubicación $l := env_V(x)$ y después actualizar (el sentido que dijimos antes) \mathbf{Store} hasta que $sto(l) = v$.

Debemos considerar el entorno de variables y el almacenamiento inicial, es decir, debemos fijar unos valores antes de la ejecución del programa. Podríamos, por ejemplo, hacer que el entorno de variables inicial llevase todas las variables a la ubicación etiquetada por 0 y que la función de almacenamiento inicial llevase \mathbf{next} en la ubicación etiquetada por 1 (desde 0).

En resumen, las configuraciones para declaraciones de variables no dependen ahora de los estados sino de las funciones env_V y sto (¡lo que cambia son estas funciones, no los estados!). Ahora, en vez de tener un objeto como $\mathcal{A}[a]s$, por ejemplo, tendremos una función $\mathcal{A}[a](sto \circ env_V)$. Más precisamente, sustituimos los estados por pares del tipo (env_V, sto) .

Conviene comparar la siguiente función de transición con la que dimos al principio de 3.2.1:

$$\langle D_V, (env_V, sto) \rangle \rightarrow_D (env'_V, sto')$$

A continuación resumimos su semántica asociada:

$$[\text{var}_{\text{ns}}] \frac{\langle D_V, (env_V[x \mapsto l], sto[l \mapsto v][\mathbf{next} \mapsto new(l)]) \rangle \rightarrow_D (env'_V, sto')}{\langle \mathbf{var} \ x := a; D_V, (env_V, sto) \rangle \rightarrow_D (env'_V, sto')}$$

donde $v := \mathcal{A}[a](sto \circ env_V)$ y $l := sto(\mathbf{next})$.

$$[\text{none}_{\text{ns}}] \frac{}{\langle \varepsilon, env_V, sto \rangle \rightarrow_D (env_V, sto)}$$

El siguiente paso consiste en extender el entorno de procedimientos para guardar el entorno de cada variable en el momento de la declaración. Por tanto, consideraremos funciones $env_P \in \mathbf{Env}_P := \mathbf{Pname} \hookrightarrow \mathbf{Stm} \times \mathbf{Env}_V \times \mathbf{Env}_P$. Por otro lado, definimos:

$$\begin{aligned} \text{udp}_P(\text{proc } p \text{ is } S; D_P, env_V, env_P) &:= \text{udp}_P(D_P, env_V, env_P[p \mapsto (S, env_V, env_P)]) \\ \text{upd}_P(\varepsilon, env_V, env_P) &:= env_P \end{aligned}$$

Las transiciones tendrán entonces la forma $env_V, env_P \vdash \langle S, sto \rangle \rightarrow sto'$, es decir, dados dos entornos respectivos de variable y procedimiento, hay una transición entre dos ubicaciones, una inicial y otra final.

Sistema (Proc, ámbito estático para variables).

[ass_{ns}]

$$\frac{}{env_V, env_P \vdash \langle x := a, sto \rangle \rightarrow sto[l \mapsto v]}$$

donde $l := env_V(x)$ y $v := \mathcal{A}[a](sto \circ env_V)$.

[skip_{ns}]

$$\frac{}{env_V, env_P \vdash \langle \text{skip}, sto \rangle \rightarrow sto}$$

[comp_{ns}]

$$\frac{env_V, env_P \vdash \langle S_1, sto \rangle \rightarrow sto' \quad env_V, env_P \vdash \langle S_2, sto' \rangle \rightarrow sto''}{env_V, env_P \vdash \langle S_1; S_2, sto \rangle \rightarrow sto''}$$

[if_{ns}^{tt}]

$$\frac{env_V, env_P \vdash \langle S_1, sto \rangle \rightarrow sto'}{env_V, env_P \vdash \langle \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2, sto \rangle \rightarrow sto'}$$

si $\mathcal{B}[b](sto \circ env_V) = \text{tt}$

[if_{ns}^{ff}]

$$\frac{env_V, env_P \vdash \langle S_2, sto \rangle \rightarrow sto'}{env_V, env_P \vdash \langle \text{if } b \text{ then } S_1 \text{ else } S_2, sto \rangle \rightarrow sto'}$$

si $\mathcal{B}[b](sto \circ env_V) = \text{ff}$

[while_{ns}^{tt}]

$$\frac{env_V, env_P \vdash \langle S, sto \rangle \rightarrow sto' \quad env_V, env_P \vdash \langle \text{while } b \text{ do } S, sto' \rangle \rightarrow sto''}{env_V, env_P \vdash \langle \text{while } b \text{ do } S, sto \rangle \rightarrow sto''}$$

si $\mathcal{B}[b](sto \circ env_V) = \text{tt}$

[while_{ns}^{ff}]

$$\frac{}{env_V, env_P \vdash \langle \text{while } b \text{ do } S, sto \rangle \rightarrow sto} \quad \text{si } \mathcal{B}[b](sto \circ env_V) = \text{ff}$$

[block_{ns}]

$$\frac{\langle D_V, (env_V, sto) \rangle \rightarrow_D (env'_V, sto') \quad env'_V, env'_P \vdash \langle S, sto' \rangle \rightarrow sto''}{env_V, env_P \vdash \langle \text{begin } D_V \ D_P \ S \text{ end}, sto \rangle \rightarrow sto''}$$

donde $env'_P := \text{upd}_P(D_P, env'_V, env_P)$.

[call_{ns}]

$$\frac{env'_V, env'_P \vdash \langle S, sto \rangle \rightarrow sto'}{env_V, env_P \vdash \langle \mathbf{call} \ p, sto \rangle \rightarrow sto'}$$

donde $env_P(p) := (S, env'_V, env'_P)$.

$[\mathbf{call}_{ns}^{\text{rec}}]$

$$\frac{env'_V, env'_P[p \mapsto (S, env'_V, env'_P)] \vdash \langle S, sto \rangle \rightarrow sto'}{env_V, env_P \vdash \langle \mathbf{call} \ p, sto \rangle \rightarrow sto'}$$

donde $env_P(p) := (S, env'_V, env'_P)$.

Notemos que no puede haber una expresión parecida a $s''[DV(D_V) \mapsto s]$, porque las variables solo toman valores accediendo a su entorno asociado.

4 | Implementación correcta

Una pregunta a realizarse sería cómo implementar un lenguaje de programación para que funcione en un ordenador. En este capítulo se mostrará, *grosso modo*, cómo realizar una implementación basándonos en cómo funciona Java. Para ello, estudiaremos los siguientes conceptos:

- Una máquina abstracta con unas instrucciones básicas.
- Traducción de **Stm** a código de la máquina abstracta.
- Corrección.
- Bisimulación.

La idea es que definiremos el comportamiento semántico de las instrucciones de la máquina abstracta mediante semántica operacional y después estudiaremos traducciones que lleven elementos de **While** en secuencias de estas instrucciones. Con *corrección* nos referimos a que, si traducimos una expresión en *código* y lo ejecutamos, entonces obtendremos el mismo resultado que el que ya describimos mediante \mathcal{S}_{ns} o \mathcal{S}_{sos} . Finalmente, veremos de pasada la bisimulación.

4.1. Máquina abstracta

4.1.1. Configuraciones e introducciones

Una *configuración* de la máquina abstracta (MA) consta de:

- Una secuencia de instrucciones a ejecutar (o código), s .
- Una pila de evaluación, e .
- Un almacén, s ,

Denotaremos por **Code** a la categoría sintáctica de las *secuencias de instrucciones*. La pila de evaluación servirá para evaluar expresiones aritméticas y booleanas. Formalmente será una lista de valores:

$$\mathbf{Stack} := (\mathbb{Z} \cup T)^*$$

De esta forma, una configuración será una terna $\langle c, e, s \rangle \in \mathbf{Code} \times \mathbf{Stack} \times \mathbf{State}$. Para mayor simplicidad, se considerará el almacén de forma parecida a como consideramos los elementos de **State** para almacenar variables.

La gramática de las instrucciones de la máquina abstracta es de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} inst &::= \text{PUSH } -n \mid \text{ADD} \mid \text{MULT} \mid \text{SUB} \\ &\quad \mid \text{TRUE} \mid \text{FALSE} \mid \text{EQ} \mid \text{NEG} \mid \text{AND} \\ &\quad \mid \text{FETCH } -x \mid \text{STORE } -x \\ &\quad \mid \text{NOOP} \mid \text{BRANCH}(c, c) \mid \text{LOOP}(c, c) \\ c &::= \varepsilon \mid inst : c \end{aligned}$$

con $c \in \mathbf{Code}$.

Se denomina *configuración final* a las ternas de la forma $\langle \varepsilon, e, s \rangle$, es decir, con el código vacío. La idea va a ser que, a partir de una configuración no final, haya una transición que vaya eliminando código y modificando la pila de evaluación y el almacén.

Pasemos a describir el sistema de semántica operacional asociado a la MA. Definimos una relación de transición:

$$\langle c, e, s \rangle \triangleright \langle c', e', s' \rangle$$

que significa lo siguiente: la configuración $\langle c', e', s' \rangle$ se obtiene de $\langle c, e, s \rangle$ en un paso de ejecución. Nótese la similitud con la semántica operacional de paso corto. Esta relación viene determinada por el siguiente sistema de transiciones:

Sistema (Semántica operacional para la MA).

$$\begin{aligned}
\langle \text{PUSH} - n : c, e, s \rangle &\triangleright \langle c, \mathcal{N}[n] : e, s \rangle \\
\langle \text{ADD} : c, z_1 : z_2 : e, s \rangle &\triangleright \langle c, (z_1 \oplus z_2) : e, s \rangle \quad \text{si } z_1, z_2 \in \mathbf{Z} \\
\langle \text{MULT} : c, z_1 : z_2 : e, s \rangle &\triangleright \langle c, (z_1 \otimes z_2) : e, s \rangle \quad \text{si } z_1, z_2 \in \mathbf{Z} \\
\langle \text{SUB} : c, z_1 : z_2 : e, s \rangle &\triangleright \langle c, (z_1 \ominus z_2) : e, s \rangle \quad \text{si } z_1, z_2 \in \mathbf{Z} \\
\langle \text{TRUE} : c, e, s \rangle &\triangleright \langle c, \mathbf{tt} : e, s \rangle \\
\langle \text{FALSE} : c, e, s \rangle &\triangleright \langle c, \mathbf{ff} : e, s \rangle \\
\langle \text{EQ} : c, z_1 : z_2 : e, s \rangle &\triangleright \langle c, (z_1 z_2) : e, s \rangle \quad \text{si } z_1, z_2 \in \mathbf{Z} \\
\langle \text{LE} : c, z_1 : z_2 : e, s \rangle &\triangleright \langle c, (z_1 \leq z_2) : e, s \rangle \quad \text{si } z_1, z_2 \in \mathbf{Z} \\
\langle \text{AND} : c, t_1 : t_2 : e, s \rangle &\triangleright \begin{cases} \langle c, \mathbf{tt} : e, s \rangle & \text{si } t_1 = t_2 = \mathbf{tt} \\ \langle c, \mathbf{ff} : e, s \rangle & \text{caso contrario} \end{cases} \\
\langle \text{NEG} : c, t : e, s \rangle &\triangleright \begin{cases} \langle c, \mathbf{ff} : e, s \rangle & \text{si } t = \mathbf{tt} \\ \langle c, \mathbf{tt} : e, s \rangle & \text{si } t = \mathbf{ff} \end{cases} \\
\langle \text{FETCH-x} : c, x, e \rangle &\triangleright \langle c, s(x) : e, s \rangle \\
\langle \text{STORE-x} : c, z : e, s \rangle &\triangleright \langle c, e, s[x \rightarrow z] \rangle \quad \text{si } z \in \mathbf{Z} \\
\langle \text{NOOP} : c, e, s \rangle &\triangleright \langle c, e, s \rangle \\
\langle \text{BRANCH}(c_1, c_2) : c, t : e, s \rangle &\triangleright \begin{cases} \langle c_1 : c, e, s \rangle & \text{si } t = \mathbf{tt} \\ \langle c_2 : c, e, s \rangle & \text{si } t = \mathbf{ff} \end{cases} \\
\langle \text{LOOP}(c_1, c_2) : c, e, s \rangle &\triangleright \langle c_1 : \text{BRANCH}(c_2, \text{LOOP}(c_1, c_2)), \text{NOOP} : c, e, s \rangle
\end{aligned}$$

Donde hemos usado ‘.’ con doble sentido: por un lado, nos referimos a la concatenación de dos secuencias de instrucciones (algo similar a ‘;’ para **Stm**) y, por otro, a la operación de anteponer un elemento a una tal secuencia. También conviene aclarar algunos de los códigos. El código $\text{LOOP}(c_1, c_2)$ es el más complejo y es el que servirá más adelante para traducir la sentencia **While**. El código $\text{BRANCH}(c_1, c_2)$ toma la idea de actuar como un **if**, siendo la condición la que esté en la cima de la pila.

4.1.2. Propiedades semánticas

Como ya hemos dicho, el sistema de transiciones anterior no es más que un sistema de semántica operacional estructural. Por tanto, podemos reescribir los conceptos que ya vimos anteriormente para esta semántica. Por ejemplo, las secuencias de derivación se denominan *secuencias de cómputo*. Una secuencia de cómputo para un código c y un almacén s puede ser *finita*, es decir, de la forma

$$\gamma_0 \triangleright \gamma_1 \triangleright \dots \triangleright \gamma_k$$

siendo $\gamma_i \in \mathbf{Code} \times \mathbf{Stack} \times \mathbf{State}$ para todo $i \leq k$ y cumpliendo $\gamma_i \triangleright \gamma_{i+1}$ para $i < k$. Por otro lado, denotamos una secuencia de cómputo *infinita* como

$$\gamma_0 \triangleright \gamma_1 \triangleright \dots$$

con $\gamma_i \triangleright \gamma_{i+1}$ para $i \geq 0$. En ambos casos, la configuración inicial será de la forma $\gamma_0 := \langle c, \varepsilon, s \rangle$, es decir, las secuencias empiezan con la pila vacía. Además, decimos que una secuencia de cómputo:

- *Termina* si y solo si es finita.
- *Cicla* si y solo si es infinita.

Nótese que, en el primer caso, se puede terminar con una configuración final o con una *configuración atascada*, como por ejemplo $\langle \text{ADD}, \varepsilon, s \rangle$.

Para no repetir las demostraciones que ya hemos visto, enunciaremos las diferentes propiedades básicas del sistema que acabamos de presentar:

Lema 4.1. Si $\langle c_1, e_1, s \rangle \triangleright^k \langle c', e', s' \rangle$, entonces $\langle c_1 : c_2, e_1 : e_2, s \rangle \triangleright^k \langle c' : c_2, e' : e_2, s' \rangle$.

Demostración. Véase la demostración del Lema 2.21. □

Lema 4.2. Si $\langle c_1 : c_2, e, s \rangle \triangleright^k \langle \varepsilon, e'', s'' \rangle$, entonces existe una configuración $\langle \varepsilon, e', s' \rangle$ y $k_1, k_2 \in \mathbb{N}$ tales que $k = k_1 + k_2$ y

$$\langle c_1, e, s \rangle \triangleright^{k_1} \langle \varepsilon, e', s' \rangle \quad \text{y} \quad \langle c_2, e', s' \rangle \triangleright^{k_2} \langle \varepsilon, e'', s'' \rangle.$$

Demostración. Véase la demostración del Lema 2.19. □

Teorema 4.3. El sistema de transiciones para el código de la máquina abstracta es determinista, es decir,

$$\gamma \triangleright \gamma' \text{ y } \gamma \triangleright \gamma'' \quad \text{implica} \quad \gamma' = \gamma''$$

Demostración. Véase la demostración del Teorema 2.22. □

4.1.3. Función de ejecución

De nuevo, por analogía sobre lo que ya comentamos en el capítulo de semántica operacional estructural, aparece la idea de una función que permita definir el valor semántico de cada expresión (aquí, secuencia de instrucciones). Más concretamente, definimos la función parcial $\mathcal{M} : \mathbf{Code} \rightarrow (\mathbf{State} \hookrightarrow \mathbf{State})$:

$$\mathcal{M}[c]s := \begin{cases} s', & \text{si } \langle c, \varepsilon, s \rangle \triangleright^* \langle \varepsilon, e, s' \rangle \\ \text{INDEFINIDO,} & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Que \mathcal{M} esté bien definida se sigue por determinismo. Conviene hacer notar que esta definición requiere que la componente del código, en la configuración final, sea vacía.

4.2. Traducción