

# Práctico 2: Especificación, derivación y verificación de programas funcionales

## Algoritmos y Estructuras de Datos I

Esta guía tiene como objetivo obtener las habilidades necesarias para llevar adelante un proceso de derivación o verificación de programas recursivos a partir de especificaciones formales.

Completan esta guía ejercicios algunos ejercicios para demostrar tanto por inducción sobre naturales, como inducción **estructural** sobre listas. Se busca mejorar la habilidad para utilizar esta técnica de prueba que es central para la tarea de cálculo de programas recursivos.

Los ejercicios de cálculo de programas tienen una dificultad creciente: en los primeros, la derivación o verificación se obtiene de manera directa a través de una demostración inductiva. Por el contrario, los ejercicios sucesivos son más complejos y requieren el uso de técnicas avanzadas: modularización y generalización.

1. a) Dada la definición recursiva de la función

$$\left| \begin{array}{l} fac : Nat \rightarrow Nat \\ \hline fac.0 \doteq 1 \\ fac.(n+1) \doteq (n+1) * fac.n \end{array} \right.$$

demostrar que la siguiente propiedad

$$P.n : fac.n = \langle \sum i : 0 \leq i < n : i * fac.i \rangle + 1$$

vale para todo  $n \in Nat$ .

- b) Dada la siguiente definición recursiva

$$\left| \begin{array}{l} sum : [Num] \rightarrow Num \\ \hline sum.[] \doteq 0 \\ sum.(x \triangleright xs) \doteq x + sum.xs \end{array} \right.$$

escriba en lenguaje natural que hace la función y demuestre que la propiedad

$$P.xs : sum.xs = \langle \sum i : 0 \leq i < \#xs : xs.i \rangle$$

vale para toda lista  $xs$ .

- c) Dada la definición recursiva de la función

$$\left| \begin{array}{l} fib : Nat \rightarrow Nat \\ \hline fib.0 \doteq 0 \\ fib.1 \doteq 1 \\ fib.(n+2) \doteq fib.n + fib.(n+1) \end{array} \right.$$

demostrar que la siguiente propiedad

$$P.n : fib.n < 2^n$$

vale para todo  $n \in Nat$ .

2. Especificar utilizando cuantificadores las funciones  $abren : [Char] \rightarrow Nat$  y  $cierran : [Char] \rightarrow Nat$ , que devuelven la cantidad de paréntesis “(” y “)” respectivamente, que ocurren en una lista de caracteres.

Luego, *verificar* que la siguiente definición recursiva satisface la especificación:

$$\begin{array}{l} abren.[] \doteq 0 \\ abren.((' \triangleright xs) \doteq abren.xs + 1 \\ abren.((' \triangleright xs) \doteq abren.xs \end{array}$$

3. A partir de las siguientes especificaciones, dar el tipo de cada función y *derivar* las soluciones algorítmicas correspondientes.

- a)  $sum.xs = \langle \sum i : 0 \leq i < \#xs : xs.i \rangle$
- b)  $sum.cuad.xs = \langle \sum i : 0 \leq i < \#xs : xs.i * xs.i \rangle$
- c)  $iga.e.xs = \langle \forall i : 0 \leq i < \#xs : xs.i = e \rangle$
- d)  $exp.x.n = x^n$
- e)  $sum.par.n = \langle \sum i : 0 \leq i \leq n \wedge par.i : i \rangle$
- f)  $cuántos.p.xs = \langle N i : 0 \leq i < \#xs : p.(xs.i) \rangle$
- g)  $busca.e.xs = \langle Min i : 0 \leq i < \#xs \wedge xs.i = e : i \rangle$

4. Expresar en lenguaje natural cada una de las siguientes sentencias formales, donde  $xs$  y  $ys$  son listas de enteros:

- a)  $\langle \forall x : x \in Num : \langle \exists y : y \in Num : x < y \rangle \rangle$
- b)  $\langle \exists x : x \in Num : \langle \forall y : y \in Num : x < y \rangle \rangle$  ¿Cuál es la diferencia con la anterior?
- c)  $\langle \forall x, z : x \in Num \wedge z \in Num \wedge x \neq z : \langle \exists y : y \in Num : x < y < z \rangle \rangle$
- d)  $\langle \exists i : 0 \leq i < \#xs : xs.i = 0 \rangle$
- e)  $\langle \forall i : 0 \leq i < \#xs : xs.i \geq 0 \rangle$
- f)  $\langle \exists i : 0 < i < \#xs : xs.(i-1) > xs.i \rangle$
- g)  $\#xs \neq \#ys \vee \langle \exists i : 0 \leq i < \#xs \wedge 0 \leq i < \#ys : xs.i \neq ys.i \rangle$

5. Derivar las siguientes funciones.

- a)  $f : Num \rightarrow Nat$  computa la suma de potencias de un número, esto es

$$f.x.n = \langle \sum i : 0 \leq i < n : x^i \rangle .$$

- b)  $pi : Nat \rightarrow Num$  computa la aproximación del número  $\pi$

$$pi.n = 4 * \langle \sum i : 0 \leq i < n : (-1)^i / (2 * i + 1) \rangle$$

**Ayuda:** Modularizar dos veces. La segunda con la función *exp* del ejercicio 3d

- c)  $f : Nat \rightarrow Nat$  computa el cubo de un número natural  $x$  utilizando únicamente sumas. La especificación es muy simple:  $f.x = x^3$  .

**Ayuda:** Usar inducción y modularización varias veces

- d)  $f.xs = \langle \exists i : 0 \leq i < \#xs : \langle \prod j : 0 \leq j < \#(xs \downarrow i) : (xs \downarrow i).j \rangle = xs.i \rangle$

6. Especificar formalmente utilizando cuantificadores cada una de las siguientes funciones descriptas informalmente. Luego, *derivar* soluciones algorítmicas para cada una.

- a)  $minimo : [Int] \rightarrow Int$ , que calcula el mínimo elemento de una lista **no vacía** de enteros.
- b)  $creciente : [Int] \rightarrow Bool$ , que determina si los elementos de una lista de enteros están ordenados en forma creciente.
- c)  $iguales : [A] \rightarrow Bool$ , que determina si los elementos de una lista de tipo  $A$  son todos iguales entre sí. Suponga que el operador  $=$  es la igualdad para el tipo  $A$ .
- d)  $prod : [Num] \rightarrow [Num] \rightarrow Num$ , que calcula el producto entre pares de elementos en iguales posiciones de las listas y suma estos resultados (producto punto). Si las listas tienen distinto tamaño se opera hasta la última posición de las más chica.
- e) dada un función  $f : Nat \rightarrow Bool$  y suponiendo  $\langle \exists n : 0 \leq n : f.n \rangle$  encontrar el mínimo natural  $x$  tal que  $f.x$ .

7. A partir de las siguientes especificaciones expresar en lenguaje natural que devuelven las funciones, agregarles su tipo y derivarlas:

- a)  $psum.xs = \langle \forall i : 0 \leq i \leq \#xs : sum.(xs \uparrow i) \geq 0 \rangle$  , con *sum* la función del ejercicio 3a.

$$b) \text{ sum\_ant}.xs = \langle \exists i : 0 \leq i < \#xs : xs.i = \text{sum}.(xs \uparrow i) \rangle$$

$$c) \text{ sum8}.xs = \langle \exists i : 0 \leq i \leq \#xs : \text{sum}.(xs \uparrow i) = 8 \rangle .$$

8. Especificar formalmente utilizando cuantificadores cada una de las siguientes funciones descriptas informalmente. Luego, *derivar* soluciones algorítmicas para cada una.

a)  $\text{cuad} : \text{Nat} \rightarrow \text{Bool}$ , que dado un natural determina si es el cuadrado de un número.

b)  $\text{n8} : [\text{Num}] \rightarrow \text{Nat}$ , que cuenta la cantidad de segmentos iniciales de una lista cuya suma es igual a 8.

9. Expresar utilizando cuantificadores las siguientes sentencias del lenguaje natural:

a) La lista  $xs$  es un segmento inicial de la lista  $ys$ .

b) La lista  $xs$  es un segmento de la lista  $ys$ .

c) La lista  $xs$  es un segmento final de la lista  $ys$ .

d) Las listas  $xs$  y  $ys$  tienen en común un segmento.

e) La lista  $xs$  de números enteros tienen la misma cantidad de elementos pares e impares.

f) La lista  $xs$  posee un segmento **no** inicial y **no** final cuyos valores son mayores a los valores del resto de la misma.

10. Derivar funciones recursivas a partir de cada una de las especificaciones que escribiste para los ejercicios 9a y 9b.

11. Derivar las funciones especificadas como:

a)  $\text{sumin}.xs = \langle \text{Min } as, bs, cs : xs = as \uparrow bs \uparrow cs : \text{sum}.bs \rangle$   
(suma mínima de un segmento).

b)  $f.xs = \langle \text{N } as, bs, cs : xs = as \uparrow bs \uparrow cs : 8 = \text{sum}.bs \rangle$   
(cantidad de segmentos que suman eso).

c)  $\text{maxiga.e}.xs = \langle \text{Max } as, bs, cs : xs = as \uparrow bs \uparrow cs \wedge \text{iga.e}.bs : \#bs \rangle$   
(máxima longitud de iguales a  $e$ )  
donde  $\text{iga}$  es la función del ejercicio 3c.

12. Describir en lenguaje natural y dar el *tipo* de cada una de las siguientes funciones especificadas formalmente:

$$a) f.xs \doteq \langle \text{N } i, j : 0 \leq i < j < \#xs : xs.i = 0 \wedge xs.j = 0 \rangle$$

$$b) g.xs \doteq \langle \text{Max } p, q : 0 \leq p < q < \#xs : xs.p + xs.q \rangle$$

$$c) h.xs \doteq \langle \text{N } k : 0 \leq k < \#xs : \langle \forall i : 0 \leq i < k : xs.i < xs.k \rangle \rangle$$

$$d) k.xs \doteq \langle \forall i, j : 0 \leq i \wedge 0 \leq j \wedge i + j = \#xs - 1 : xs.i = xs.j \rangle$$

$$e) l.xs \doteq \langle \text{Max } p, q : 0 \leq p \leq q < \#xs \wedge \langle \forall i : p \leq i < q : xs.i \geq 0 \rangle : q - p \rangle$$

13. Derivar la función definida en el ejercicio 12b.

14. Derivar una definición recursiva para la función  $f : [\text{Num}] \rightarrow [\text{Num}] \rightarrow \text{Num}$ , que calcula la mínima distancia entre valores de las listas  $xs$  y  $ys$ , y cuya especificación es la siguiente:

$$f.xs.ys = \langle \text{Min } i, j : 0 \leq i < \#xs \wedge 0 \leq j < \#ys : |xs.i - ys.j| \rangle$$

15. Derivar una definición recursiva para la función  $g : [\text{Char}] \rightarrow [\text{Char}] \rightarrow \text{Bool}$ , especificada como sigue:

$$g.xs.ys = \langle \exists as, bs, c, cs : xs = as \uparrow bs \wedge ys = as \uparrow (c \triangleright cs) : bs = [] \vee bs.0 < c \rangle$$

Decir en palabras cuando  $g.xs.ys$  es *True*.

## Ejercicios extra

16. Dada la siguiente definición recursiva

$$\left| \begin{array}{l} \text{rev} : [A] \rightarrow [A] \\ \text{rev}.[ ] \doteq [ ] \\ \text{rev}(x \triangleright xs) \doteq \text{rev}.xs \uparrow [x] \end{array} \right.$$

escriba en lenguaje natural que hace la función y demuestre que la propiedad

$$P.xs.ys : \text{rev}(xs \uparrow ys) = \text{rev}.ys \uparrow \text{rev}.xs$$

vale para toda lista  $xs$  y  $ys$ .

17. Para las funciones  $\text{sum} : [Num] \rightarrow Num$  y  $\text{duplica} : [Num] \rightarrow [Num]$  definidas recursivamente como:

$$\begin{array}{ll} \text{sum}.[ ] \doteq 0 & \text{duplica}.[ ] \doteq [ ] \\ \text{sum}(x \triangleright xs) \doteq x + \text{sum}.xs & \text{duplica}(x \triangleright xs) \doteq (2 * x) \triangleright \text{duplica}.xs \end{array}$$

Demostre que se satisface  $\text{sum}(\text{duplica}.xs) = 2 * \text{sum}.xs$ .

18. Dada la siguiente definición recursiva para la función  $\text{repetir} : Nat \rightarrow Nat \rightarrow [Nat]$ , que dada una cantidad  $n$  y un valor  $x$  construye una lista de longitud  $n$  con elementos repetidos  $x$ :

$$\begin{array}{ll} \text{repetir}.0.x \doteq [ ] & \\ \text{repetir}(n + 1).x \doteq x \triangleright \text{repetir}.n.x & \end{array}$$

Demostre que es válido  $\# \text{repetir}.n.x = n$ .

19. Expresar utilizando cuantificadores las siguientes sentencias del lenguaje natural:

- El elemento  $e$  ocurre un número par de veces en la lista  $xs$ .
- El elemento  $e$  ocurre en las posiciones pares de la lista  $xs$ .
- El elemento  $e$  ocurre únicamente en las posiciones pares de la lista  $xs$ .
- Si  $e$  ocurre en la lista  $xs$ , entonces  $l$  ocurre en alguna posición anterior en la misma lista.
- Existe un elemento de la lista  $xs$  que es estrictamente mayor a todos los demás.
- Cualquier valor  $x$  que anula la función  $f$  (es decir que  $f.x = 0$ ) ocurre en la lista  $xs$ .
- En la lista  $xs$  solo ocurren valores que anulan la función  $f$ .

20. Derivar funciones recursivas a partir de cada una de las especificaciones que escribió para el ejercicio 19.

21. Sea  $\text{fib}$  la definición recursiva estándar para la función de Fibonacci. Calcule la función de Fibolucci,  $\text{Fbl} : Nat \rightarrow Nat$ , especificada como:

$$\text{Fbl}.n = \langle \sum i : 0 \leq i < n : \text{fib}.i \times \text{fib}.(n - i) \rangle$$

22. Derivar la función recursiva a partir de la especificación del ejercicio 9c.

23. [Torres de Hanoi]. Se tienen tres postes numerados 0, 1 y 2, y  $n$  discos de distinto tamaño. Inicialmente se encuentran todos los discos ubicados en el poste 0, ordenados según el tamaño con el disco más grande en la base. El problema consiste en llevar todos los discos al poste 2, con las siguientes restricciones:

- Se puede mover sólo un disco a la vez
- Sólo se puede mover el disco que se encuentra mas arriba en algún poste.
- No se puede colocar un disco sobre otro de menor tamaño.

Resuelva los siguientes ítems:

- a) Sea  $B = \{0, 1, 2\}$ . Definí la función  $hanoi : B \rightarrow B \rightarrow B \rightarrow Nat \rightarrow [(B, B)]$  tal que  $hanoi.a.b.c.n$  calcula la secuencia de *movimientos* para llevar  $n$  discos desde el poste  $a$  hacia el poste  $c$ , utilizando posiblemente el poste  $b$  de forma auxiliar. Un *movimiento* es un par  $(B, B)$  cuya primer componente indica el poste de salida, y la segunda el poste de llegada.

**Ayuda:** Por ejemplo,  $hanoi$  para los postes 0, 1 y 2, con dos discos es:  $hanoi.0.1.2.2 = [(0, 1), (0, 2), (1, 2)]$

- b) Demostrá  $\#hanoi.a.b.c.n = 2^n - 1$

- c) ¿En qué movimiento se cambia de poste por primera vez el disco de mayor tamaño?

24. El siguiente razonamiento intenta demostrar que un grupo cualquiera de gatos está compuesto íntegramente por gatos negros:

La demostración es por inducción en el número de gatos del grupo. Para el caso de 0 gatos el resultado es inmediato puesto que cualquier gato del grupo es negro. Consideremos ahora un grupo de  $n + 1$  gatos y tomemos un gato cualquiera de ellos. El grupo de los gatos restantes tiene  $n$  integrantes y por hipótesis inductiva son todos negros. Luego tenemos  $n$  gatos negros y uno apartado cuyo color no podemos predecir. Intercambiamos ahora el gato apartado con uno del grupo de  $n$  gatos, el cual sabemos con total seguridad que es negro. Así tenemos por un lado un gato negro y por otro un grupo de  $n$  gatos. Nuevamente por hipótesis inductiva, el grupo de  $n$  gatos contiene sólo gatos negros, y como el que está apartado también es negro, tenemos que los  $n + 1$  gatos son negros.

¿Cuál es el error en este intento de demostración?

25. Especificá formalmente utilizando cuantificadores cada una de las siguientes funciones descriptas informalmente. Luego, *derivá* soluciones algorítmicas para cada una.

- a) *listas\_iguales* :  $[A] \rightarrow [A] \rightarrow Bool$ , que determina si dos listas son iguales, es decir, contienen los mismos elementos en las mismas posiciones respectivamente.

- b) *divide* :  $Nat \rightarrow Nat \rightarrow Bool$ , que determina si el primer parámetro divide al segundo.

- c) *primo?* :  $Nat \rightarrow Bool$ , que determina si un número es primo.

26. Especificar y derivar la función que calcula la cantidad de apariciones de un segmento en una lista.

**Ayuda:** Ver cómo se especificó y derivó el ejemplo de la sección 9b.

27. Derivar las funciones a partir de las especificaciones en el ejercicio 12.