Introducción a la Programación

Algoritmos y Estructuras de Datos I

Segundo cuatrimestre de 2025

Recursión sobre enteros

IP - AED I: Temario de la clase

- Recursión sobre enteros
  - ¿Qué es la recursión?
  - Reducción en la recursión
  - ¿Cómo pensar recursivamente?
  - Inducción y recursión
  - Generalización de funciones
  - Recursión en más de un parámetro
  - Algunos ejercicios de la guía 4

Recursión

- Hasta ahora, especificamos funciones que consistían en "expresiones sencillas".

Recursión

- Hasta ahora, especificamos funciones que consistían en "expresiones sencillas".
- ¿Cómo es una función en Haskell para calcular el factorial de un número $n \in \mathbb{N}_0$?

Recursión

- Hasta ahora, especificamos funciones que consistían en "expresiones sencillas".
- ¿Cómo es una función en Haskell para calcular el factorial de un número $n \in \mathbb{N}_0$?

$$n! = \prod_{k=1}^{n} k \qquad\qquad n! = \begin{cases} 1 & \text{si } n = 0 \\ n \times (n-1)! & \text{si } n > 0 \end{cases}$$

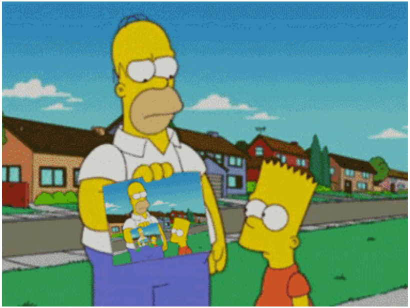
Recursión

- Hasta ahora, especificamos funciones que consistían en "expresiones sencillas".
- ¿Cómo es una función en Haskell para calcular el factorial de un número $n \in \mathbb{N}_0$?

$$n! = \prod_{k=1}^{n} k \qquad\qquad n! = \begin{cases} 1 & \text{si } n = 0 \\ n \times (n-1)! & \text{si } n > 0 \end{cases}$$

¡La segunda definición de `factorial` involucra a esta misma función del lado derecho!

```haskell
factorial :: Int -> Int
factorial n
  | n == 0 = 1
  | n > 0 = n * factorial (n-1)
```



Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

¿Cómo reduce la expresión `factorial 3`?

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

¿Cómo reduce la expresión `factorial 3`?

`factorial 3`

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

¿Cómo reduce la expresión `factorial 3`?

`factorial 3` $\rightsquigarrow$ `3 * factorial 2`

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

¿Cómo reduce la expresión `factorial 3`?

`factorial 3` ⇝ `3 * factorial 2` ⇝ `3 * (2 * factorial 1)`

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

¿Cómo reduce la expresión `factorial 3`?

`factorial 3` ⇝ `3 * factorial 2` ⇝ `3 * (2 * factorial 1)` ⇝
⇝ `3 * (2 * (1 * factorial 0))`

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

¿Cómo reduce la expresión `factorial 3`?

`factorial 3` ⇝ `3 * factorial 2` ⇝ `3 * (2 * factorial 1)` ⇝
⇝ `3 * (2 * (1 * factorial 0))` ⇝ `3 * (2 * (1 * 1))`

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

¿Cómo reduce la expresión `factorial 3`?

`factorial 3` ⇝ `3 * factorial 2` ⇝ `3 * (2 * factorial 1)` ⇝
⇝ `3 * (2 * (1 * factorial 0))` ⇝ `3 * (2 * (1 * 1))` ⇝ `3 * (2 * 1)`

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

¿Cómo reduce la expresión `factorial 3`?

`factorial 3` ⇝ `3 * factorial 2` ⇝ `3 * (2 * factorial 1)` ⇝
⇝ `3 * (2 * (1 * factorial 0))` ⇝ `3 * (2 * (1 * 1))` ⇝ `3 * (2 * 1)`
⇝ `3 * 2`

Recursión y reducción

¿Podemos definirla usando `otherwise`?

```
factorial :: Int -> Int
factorial n | n == 0 = 1
            | otherwise = n * factorial (n-1)
```

¿Podemos definirla usando *pattern matching*?

```
factorial :: Int -> Int
factorial 0 = 1
factorial n = n * factorial (n-1)
```

¿Cómo reduce la expresión `factorial 3`?

`factorial 3` ⇝ `3 * factorial 2` ⇝ `3 * (2 * factorial 1)` ⇝
⇝ `3 * (2 * (1 * factorial 0))` ⇝ `3 * (2 * (1 * 1))` ⇝ `3 * (2 * 1)`
⇝ `3 * 2` ⇝ `6`

Asegurarse de llegar a un caso base

Veamos este programa recursivo para determinar si un entero positivo es par:

```
esPar :: Int -> Bool
esPar n | n==0 = True
        | otherwise = esPar (n-2)
```

¿Qué problema tiene esta función?

Asegurarse de llegar a un caso base

Veamos este programa recursivo para determinar si un entero positivo es par:

```
esPar :: Int -> Bool
esPar n | n==0 = True
        | otherwise = esPar (n-2)
```

¿Qué problema tiene esta función?

¿Cómo se arregla?

Asegurarse de llegar a un caso base

Veamos este programa recursivo para determinar si un entero positivo es par:

```
esPar :: Int -> Bool
esPar n | n==0 = True
        | otherwise = esPar (n-2)
```

¿Qué problema tiene esta función?

¿Cómo se arregla?

```
esPar :: Int -> Bool
esPar n | n==0 = True
        | n==1 = False
        | otherwise = esPar (n-2)
```

```
esPar :: Int -> Bool
esPar n | n==0 = True
        | otherwise = not (esPar (n-1))
```

¿Cómo pensar recursivamente?

- Si queremos definir una función recursiva, por ejemplo `factorial`,
  - en el paso recursivo, suponiendo que tenemos el resultado para el caso anterior, ¿qué falta para poder obtener el resultado que quiero? En este caso, suponemos ya calculado `factorial (n-1)` y lo combinamos multiplicándolo por `n` para lograr obtener `factorial n`.

¿Cómo pensar recursivamente?

- Si queremos definir una función recursiva, por ejemplo `factorial`,
  - en el paso recursivo, suponiendo que tenemos el resultado para el caso anterior, ¿qué falta para poder obtener el resultado que quiero? En este caso, suponemos ya calculado `factorial (n-1)` y lo combinamos multiplicándolo por `n` para lograr obtener `factorial n`.
  - además, identificamos el (o los) casos base. En el ejemplo de `factorial`, definimos como casos base la función sobre 0: `factorial n | n == 0 = 1`

¿Cómo pensar recursivamente?

- Si queremos definir una función recursiva, por ejemplo `factorial`,
  - en el paso recursivo, suponiendo que tenemos el resultado para el caso anterior, ¿qué falta para poder obtener el resultado que quiero? En este caso, suponemos ya calculado `factorial (n-1)` y lo combinamos multiplicándolo por `n` para lograr obtener `factorial n`.
  - además, identificamos el (o los) casos base. En el ejemplo de `factorial`, definimos como casos base la función sobre 0:
    `factorial n | n == 0 = 1`
- Propiedades de una definición recursiva:
  - las llamadas recursivas tienen que *"acercarse"* a un caso base.
  - tiene que tener uno o más casos base que dependerán del tipo de llamado recursivo. Un caso base, es aquella expresión que no tiene un llamado recursivo.

¿Cómo pensar recursivamente?

- Casos bases: identificar el o los casos bases.
- Casos recursivos: **suponiendo que la llamada recursiva es correcta**, ¿qué tengo que hacer para completar la solución?

¿Cómo pensar recursivamente?

- Casos bases: identificar el o los casos bases.
- Casos recursivos: **suponiendo que la llamada recursiva es correcta**, ¿qué tengo que hacer para completar la solución?

Otro Ejemplo:

```
sumaLosPrimerosNImpares :: Integer -> Integer
sumaLosPrimerosNImpares n
 | n == 1 = 1
 | n > 1 = ... sumaLosPrimerosNImpares (n-1) ...
```

- Verificar que (n==1) es el caso base, está bien definido y no hay otros.
- Si podemos dar una solución correcta en base a una llamada recursiva correcta entonces, por inducción, ¡todos van a ser correctos!

¿Cómo pensar recursivamente?

- Casos bases: identificar el o los casos bases.
- Casos recursivos: **suponiendo que la llamada recursiva es correcta**, ¿qué tengo que hacer para completar la solución?

Otro Ejemplo:

```
sumaLosPrimerosNImpares :: Integer -> Integer
sumaLosPrimerosNImpares n
 | n == 1 = 1
 | n > 1 = ... sumaLosPrimerosNImpares (n-1) ...
```

- Verificar que (n==1) es el caso base, está bien definido y no hay otros.
- Si podemos dar una solución correcta en base a una llamada recursiva correcta entonces, por inducción, ¡todos van a ser correctos!

Con el paso anterior resuelto: ¿Qué falta para que el nuevo paso esté resuelto?

¿Cómo pensar recursivamente?

- Casos bases: identificar el o los casos bases.
- Casos recursivos: **suponiendo que la llamada recursiva es correcta**, ¿qué tengo que hacer para completar la solución?

Otro Ejemplo:

```
sumaLosPrimerosNImpares :: Integer -> Integer
sumaLosPrimerosNImpares n
 | n == 1 = 1
 | n > 1 = ... sumaLosPrimerosNImpares (n-1) ...
```

- Verificar que (n==1) es el caso base, está bien definido y no hay otros.
- Si podemos dar una solución correcta en base a una llamada recursiva correcta entonces, por inducción, ¡todos van a ser correctos!

Con el paso anterior resuelto: ¿Qué falta para que el nuevo paso esté resuelto?

```
 | n > 1 = n_esimoImpar + sumaLosPrimerosNImpares (n-1)
```

Cambiamos el problema: ahora sólo falta definir `n_esimoImpar`.

¿Cómo pensar recursivamente?

- Casos bases: identificar el o los casos bases.
- Casos recursivos: **suponiendo que la llamada recursiva es correcta**, ¿qué tengo que hacer para completar la solución?

Otro Ejemplo:

```
sumaLosPrimerosNImpares :: Integer -> Integer
sumaLosPrimerosNImpares n
 | n == 1 = 1
 | n > 1 = ... sumaLosPrimerosNImpares (n-1) ...
```

- Verificar que (n==1) es el caso base, está bien definido y no hay otros.
- Si podemos dar una solución correcta en base a una llamada recursiva correcta entonces, por inducción, ¡todos van a ser correctos!

Con el paso anterior resuelto: ¿Qué falta para que el nuevo paso esté resuelto?

```
 | n > 1 = n_esimoImpar + sumaLosPrimerosNImpares (n-1)
```

Cambiamos el problema: ahora sólo falta definir `n_esimoImpar`.

```
 | n > 1 = n_esimoImpar + sumaLosPrimerosNImpares (n-1)
     where n_esimoImpar = 2*n - 1
```

Inducción vs. Recursión

- Probar por inducción
  $P(n) : \sum_{i=1}^{n}(2i - 1) = n^2$

- Implementar una función recursiva para
  $f(n) = \sum_{i=1}^{n}(2i - 1)$

Inducción vs. Recursión

- Probar por inducción $P(n) : \sum_{i=1}^{n}(2i-1) = n^2$
- Vale para $n = 1 : \sum_{i=1}^{1}(2i-1) = 1^2$

- Implementar una función recursiva para $f(n) = \sum_{i=1}^{n}(2i-1)$
- Caso base en Haskell: `f 1 = 1`

Inducción vs. Recursión

- Probar por inducción $P(n) : \sum_{i=1}^{n}(2i-1) = n^2$
- Vale para $n = 1 : \sum_{i=1}^{1}(2i-1) = 1^2$
- Supongo que vale $P(n)$, quiero probar $P(n+1)$

- Implementar una función recursiva para $f(n) = \sum_{i=1}^{n}(2i-1)$
- Caso base en Haskell: `f 1 = 1`
- Supongo que ya sé calcular $f(n-1)$, quiero calcular $f(n)$

Inducción vs. Recursión

- Probar por inducción $P(n) : \sum_{i=1}^{n}(2i-1) = n^2$
- Vale para $n = 1 : \sum_{i=1}^{1}(2i-1) = 1^2$
- Supongo que vale $P(n)$, quiero probar $P(n+1)$
- ¿Qué relación hay entre $\sum_{i=1}^{n}(2i-1)$ y $\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1)$?

$$\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1) = \left(\sum_{i=1}^{n}(2i-1)\right) + 2n+1$$

- Implementar una función recursiva para $f(n) = \sum_{i=1}^{n}(2i-1)$
- Caso base en Haskell: `f 1 = 1`
- Supongo que ya sé calcular $f(n-1)$, quiero calcular $f(n)$
- ¿Qué relación hay entre $\sum_{i=1}^{n-1}(2i-1)$ y $\sum_{i=1}^{n}(2i-1)$?

$$\sum_{i=1}^{n}(2i-1) = \left(\sum_{i=1}^{n-1}(2i-1)\right) + 2n-1$$

Inducción vs. Recursión

- Probar por inducción $P(n) : \sum_{i=1}^{n}(2i-1) = n^2$
- Vale para $n = 1 : \sum_{i=1}^{1}(2i-1) = 1^2$
- Supongo que vale $P(n)$, quiero probar $P(n+1)$
- ¿Qué relación hay entre $\sum_{i=1}^{n}(2i-1)$ y $\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1)$?

$$\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1) = \left(\sum_{i=1}^{n}(2i-1)\right) + 2n + 1$$

- Uso la Hipótesis Inductiva $P(n)$:

$$\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1) = n^2 + 2n + 1 = (n+1)^2$$

- Implementar una función recursiva para $f(n) = \sum_{i=1}^{n}(2i-1)$
- Caso base en Haskell: `f 1 = 1`
- Supongo que ya sé calcular $f(n-1)$, quiero calcular $f(n)$
- ¿Qué relación hay entre $\sum_{i=1}^{n-1}(2i-1)$ y $\sum_{i=1}^{n}(2i-1)$?

$$\sum_{i=1}^{n}(2i-1) = \left(\sum_{i=1}^{n-1}(2i-1)\right) + 2n - 1$$

- Uso la función que sé calcular: $f(n) = f(n-1) + 2n - 1$

  En Haskell: `f n = f (n-1) + 2*n - 1`

Inducción vs. Recursión

- Probar por inducción $P(n) : \sum_{i=1}^{n}(2i-1) = n^2$
- Vale para $n = 1 : \sum_{i=1}^{1}(2i-1) = 1^2$
- Supongo que vale $P(n)$, quiero probar $P(n+1)$
- ¿Qué relación hay entre $\sum_{i=1}^{n}(2i-1)$ y $\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1)$?

$$\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1) = \left(\sum_{i=1}^{n}(2i-1)\right) + 2n+1$$

- Uso la Hipótesis Inductiva $P(n)$:

$$\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1) = n^2 + 2n + 1 = (n+1)^2$$

- ¡¿Pero cómo?! ¡¿Estoy usando lo que quiero probar?!

- Implementar una función recursiva para $f(n) = \sum_{i=1}^{n}(2i-1)$
- Caso base en Haskell: `f 1 = 1`
- Supongo que ya sé calcular $f(n-1)$, quiero calcular $f(n)$
- ¿Qué relación hay entre $\sum_{i=1}^{n-1}(2i-1)$ y $\sum_{i=1}^{n}(2i-1)$?

$$\sum_{i=1}^{n}(2i-1) = \left(\sum_{i=1}^{n-1}(2i-1)\right) + 2n-1$$

- Uso la función que sé calcular: $f(n) = f(n-1) + 2n - 1$

  En Haskell: `f n = f (n-1) + 2*n - 1`

- ¡¿Pero cómo?! ¡¿Estoy usando la función que quiero definir?!

Inducción vs. Recursión

- Probar por inducción $P(n) : \sum_{i=1}^{n}(2i-1) = n^2$
- Vale para $n = 1 : \sum_{i=1}^{1}(2i-1) = 1^2$
- Supongo que vale $P(n)$, quiero probar $P(n+1)$
- ¿Qué relación hay entre $\sum_{i=1}^{n}(2i-1)$ y $\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1)$?

$$\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1) = \left(\sum_{i=1}^{n}(2i-1)\right) + 2n + 1$$

- Uso la Hipótesis Inductiva $P(n)$:

$$\sum_{i=1}^{n+1}(2i-1) = n^2 + 2n + 1 = (n+1)^2$$

- ¡¿Pero cómo?! ¡¿Estoy usando lo que quiero probar?!
- Ah, claro... vale $P(1)$ y $P(n) => P(n+1)$, entonces ¡vale para todo n!(por teo Inducción)

- Implementar una función recursiva para $f(n) = \sum_{i=1}^{n}(2i-1)$
- Caso base en Haskell: `f 1 = 1`
- Supongo que ya sé calcular $f(n-1)$, quiero calcular $f(n)$
- ¿Qué relación hay entre $\sum_{i=1}^{n-1}(2i-1)$ y $\sum_{i=1}^{n}(2i-1)$?

$$\sum_{i=1}^{n}(2i-1) = \left(\sum_{i=1}^{n-1}(2i-1)\right) + 2n - 1$$

- Uso la función que sé calcular: $f(n) = f(n-1) + 2n - 1$

  En Haskell: `f n = f (n-1) + 2*n - 1`

- ¡¿Pero cómo?! ¡¿Estoy usando la función que quiero definir?!
- Ah, claro... está definido $f(1)$ y con $f(n-1)$ sé obtener $f(n)$, entonces ¡puedo calcular f para todo n!

Generalización de funciones

¿Una fácil?.. o no tanto

- Implementar una función `sumaDivisores :: Integer -> Integer` que calcule la suma de los divisores de un número entero positivo.

Generalización de funciones

¿Una fácil?.. o no tanto

- Implementar una función `sumaDivisores :: Integer -> Integer` que calcule la suma de los divisores de un número entero positivo.

problema *sumaDivisores*$(n : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{n > 0\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n}$ (si $(n \bmod i = 0)$ entonces i sino $0)\}$

Generalización de funciones

¿Una fácil?.. o no tanto

- Implementar una función `sumaDivisores :: Integer -> Integer` que calcule la suma de los divisores de un número entero positivo.

problema $sumaDivisores(n : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{n > 0\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n}$ (si $(n \bmod i = 0)$ entonces i sino $0)\}$
}

Generalización de funciones

¿Una fácil?.. o no tanto

- Implementar una función `sumaDivisores :: Integer -> Integer` que calcule la suma de los divisores de un número entero positivo.

problema *sumaDivisores*$(n : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{n > 0\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n}$ (si $(n$ mod $i = 0)$ entonces i sino $0)\}$

Pregunta clave: ¿alcanza con hacer recursión sobre n?

Generalización de funciones

¿Una fácil?.. o no tanto

- Implementar una función `sumaDivisores :: Integer -> Integer` que calcule la suma de los divisores de un número entero positivo.

problema *sumaDivisores*($n : \mathbb{Z}$) : $\mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{n > 0\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n}$ (si $(n \text{ mod } i = 0)$ entonces i sino $0)\}$
}

Pregunta clave: ¿alcanza con hacer recursión sobre n?

No hay ninguna relación sencilla entre `sumaDivisores n` y `sumaDivisores (n-k)` (para ningún k particular).

Generalización de funciones

¿Una fácil?.. o no tanto

- Implementar una función `sumaDivisores :: Integer -> Integer` que calcule la suma de los divisores de un número entero positivo.

problema $sumaDivisores(n : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
 requiere: $\{n > 0\}$
 asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n} (\text{si } (n \bmod i = 0) \text{ entonces } i \text{ sino } 0)\}$

Pregunta clave: ¿alcanza con hacer recursión sobre n?

No hay ninguna relación sencilla entre `sumaDivisores n` y `sumaDivisores (n-k)` (para ningún k particular).

¿Qué sucede si definimos primero una funcion **más general** que devuelve la suma de los divisores de un número hasta cierto punto?

```
sumaDivisoresHasta :: Integer -> Integer -> Integer
```

Generalización de funciones

¿Una fácil?.. o no tanto

- Implementar una función `sumaDivisores :: Integer -> Integer` que calcule la suma de los divisores de un número entero positivo.

problema *sumaDivisores*$(n : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{n > 0\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n}$ (si $(n \bmod i = 0)$ entonces i sino $0)\}$
}

Pregunta clave: ¿alcanza con hacer recursión sobre n?

No hay ninguna relación sencilla entre `sumaDivisores n` y `sumaDivisores (n-k)` (para ningún k particular).

¿Qué sucede si definimos primero una funcion **más general** que devuelve la suma de los divisores de un número hasta cierto punto?

```
sumaDivisoresHasta :: Integer -> Integer -> Integer
```

Ahora **sí** existe una relación sencilla entre `sumaDivisoresHasta n k` y `sumaDivisoresHasta n (k-1)`. ¿Por qué?

Generalización de funciones

Veamos cómo sería la especificación:

problema $sumaDivisoresHasta(n : \mathbb{Z}, k : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
requiere: $\{(n > 0) \land (k > 0)\}$
asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{k}$ (si $(n$ mod $i = 0)$ entonces i sino $0)\}$

Generalización de funciones

Veamos cómo sería la especificación:

problema $sumaDivisoresHasta(n : \mathbb{Z}, k : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \wedge (k > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{k}$ (si $(n \bmod i = 0)$ entonces i sino $0)\}$
}

Ahora podemos definir esta función en Haskell recursivamente

```
sumaDivisoresHasta :: Integer -> Integer -> Integer
sumaDivisoresHasta n 1 = 1
sumaDivisoresHasta n i | (mod n i == 0) = i +
     sumaDivisoresHasta n (i-1)
                       | otherwise = sumaDivisoresHasta n (i-1)
```

Generalización de funciones

Veamos cómo sería la especificación:

problema *sumaDivisoresHasta*$(n : \mathbb{Z}, k : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
requiere: $\{(n > 0) \land (k > 0)\}$
asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{k}$ (si $(n \bmod i = 0)$ entonces i sino $0)\}$
}

Ahora podemos definir esta función en Haskell recursivamente

```
sumaDivisoresHasta :: Integer -> Integer -> Integer
sumaDivisoresHasta n 1 = 1
sumaDivisoresHasta n i | (mod n i == 0) = i +
     sumaDivisoresHasta n (i-1)
                       | otherwise = sumaDivisoresHasta n (i-1)
```

¿Y por último, cómo definimos `SumaDivisores` utilizando lo anterior?

Generalización de funciones

Veamos cómo sería la especificación:

problema $sumaDivisoresHasta(n : \mathbb{Z}, k : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \land (k > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{k}$ (si $(n \bmod i = 0)$ entonces i sino $0)\}$
}

Ahora podemos definir esta función en Haskell recursivamente

```
sumaDivisoresHasta :: Integer -> Integer -> Integer
sumaDivisoresHasta n 1 = 1
sumaDivisoresHasta n i | (mod n i == 0) = i +
     sumaDivisoresHasta n (i-1)
                       | otherwise = sumaDivisoresHasta n (i-1)
```

¿Y por último, cómo definimos `SumaDivisores` utilizando lo anterior?

```
sumaDivisores :: Integer -> Integer
sumaDivisores n = sumaDivisoresHasta n n
```

Generalización de funciones

Veamos cómo sería la especificación:

problema $sumaDivisoresHasta(n : \mathbb{Z}, k : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \land (k > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{k} (\text{si } (n \bmod i = 0) \text{ entonces } i \text{ sino } 0)\}$
}

Ahora podemos definir esta función en Haskell recursivamente

```
sumaDivisoresHasta :: Integer -> Integer -> Integer
sumaDivisoresHasta n 1 = 1
sumaDivisoresHasta n i | (mod n i == 0) = i +
     sumaDivisoresHasta n (i-1)
                       | otherwise = sumaDivisoresHasta n (i-1)
```

¿Y por último, cómo definimos `SumaDivisores` utilizando lo anterior?

```
sumaDivisores :: Integer -> Integer
sumaDivisores n = sumaDivisoresHasta n n
```

Entonces, `SumaDivisores`, ¿es una función recursiva?

Recursión en más de un parámetro

Implementar la siguiente función:

$$f(n, m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j$$

Recursión en más de un parámetro

Implementar la siguiente función:

$$f(n, m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j$$

Veamos primero la especificación:

problema *sumatoriaDoble*$(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \land (m > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j\}$
}

Recursión en más de un parámetro

Implementar la siguiente función:

$$f(n, m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j$$

Veamos primero la especificación:

problema $sumatoriaDoble(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \wedge (m > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j\}$
}

Recursión en más de un parámetro

Implementar la siguiente función:

$$f(n, m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j$$

Veamos primero la especificación:

problema $sumatoriaDoble(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \wedge (m > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j\}$
}

Pregunta clave: ¿alcanza con hacer recursión sobre n?

Recursión en más de un parámetro

Implementar la siguiente función:

$$f(n, m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j$$

Veamos primero la especificación:

problema *sumatoriaDoble*$(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
requiere: $\{(n > 0) \land (m > 0)\}$
asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j\}$
}

Pregunta clave: ¿alcanza con hacer recursión sobre n?

¿Qué sucede si definimos primero una funcion **más específica** que devuelve la sumatoria interna?

```
sumatoriaInterna :: Integer -> Integer -> Integer
```

Recursión en más de un parámetro

Implementar la siguiente función:

$$f(n, m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j$$

Veamos primero la especificación:

problema *sumatoriaDoble*$(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \land (m > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} i^j\}$
}

Pregunta clave: ¿alcanza con hacer recursión sobre n?

¿Qué sucede si definimos primero una funcion **más específica** que devuelve la sumatoria interna?

```
sumatoriaInterna :: Integer -> Integer -> Integer
```

Ahora parece más sencillo definir `sumatoriaDoble n m` utilizando `sumatoriaInterna n m`. ¿Cómo lo hacemos?

Recursión en más de un parámetro

Veamos cómo sería la especificación:

problema $sumatoriaInterna(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \land (m > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{j=1}^{m} n^j\}$
}

Recursión en más de un parámetro

Veamos cómo sería la especificación:

problema $sumatoriaInterna(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \land (m > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{j=1}^{m} n^j\}$
}

Ahora podemos definir esta función en Haskell recursivamente

```
sumatoriaInterna :: Integer -> Integer -> Integer
sumatoriaInterna _ 0 = 0
sumatoriaInterna n j = n^j + sumatoriaInterna n (j-1)
```

Recursión en más de un parámetro

Veamos cómo sería la especificación:

problema *sumatoriaInterna*$(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \land (m > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{j=1}^{m} n^j\}$
}

Ahora podemos definir esta función en Haskell recursivamente

```haskell
sumatoriaInterna :: Integer -> Integer -> Integer
sumatoriaInterna _ 0 = 0
sumatoriaInterna n j = n^j + sumatoriaInterna n (j-1)
```

¿Y por último, cómo definimos `sumatoriaDoble` utilizando lo anterior?

Recursión en más de un parámetro

Veamos cómo sería la especificación:

problema *sumatoriaInterna*$(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \land (m > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{j=1}^{m} n^j\}$
}

Ahora podemos definir esta función en Haskell recursivamente

```haskell
sumatoriaInterna :: Integer -> Integer -> Integer
sumatoriaInterna _ 0 = 0
sumatoriaInterna n j = n^j + sumatoriaInterna n (j-1)
```

¿Y por último, cómo definimos `sumatoriaDoble` utilizando lo anterior?

```haskell
sumatoriaDoble :: Integer -> Integer -> Integer
sumatoriaDoble 0 _ = 0
sumatoriaDoble n m = sumatoriaDoble (n-1) m + sumatoriaInterna n m
```

Recursión en más de un parámetro

Veamos cómo sería la especificación:

problema *sumatoriaInterna*$(n : \mathbb{Z}, m : \mathbb{Z}) : \mathbb{Z}$ {
  requiere: $\{(n > 0) \wedge (m > 0)\}$
  asegura: $\{res = \sum_{j=1}^{m} n^j\}$
}

Ahora podemos definir esta función en Haskell recursivamente

```
sumatoriaInterna :: Integer -> Integer -> Integer
sumatoriaInterna _ 0 = 0
sumatoriaInterna n j = n^j + sumatoriaInterna n (j-1)
```

¿Y por último, cómo definimos `sumatoriaDoble` utilizando lo anterior?

```
sumatoriaDoble :: Integer -> Integer -> Integer
sumatoriaDoble 0 _ = 0
sumatoriaDoble n m = sumatoriaDoble (n-1) m + sumatoriaInterna n m
```

Entonces, `sumatoriaDoble`, ¿cuántas recursiones involucra?