

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

Informática (2016–17)

José A. Alonso Jiménez

Grupo de Lógica Computacional
Departamento de Ciencias de la Computación e I.A.
Universidad de Sevilla

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica
2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
3. Producto de cadenas de matrices (PCM)
4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)
5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo(CM)
6. Problema del viajante (PV)

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica

Introducción a la programación dinámica

El patrón de la programación dinámica

2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica

3. Producto de cadenas de matrices (PCM)

4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)

5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo (CM)

6. Problema del viajante (PV)

Divide y vencerás vs programación dinámica

- ▶ Inconveniente de la técnica divide y vencerás: la posibilidad de crear idénticos subproblemas y repetición del trabajo.
- ▶ Idea de la programación dinámica: resolver primero los subproblemas menores, guardar los resultados y usar los resultados de los subproblemas intermedios para resolver los mayores.

Cálculo de Fibonacci por divide y vencerás

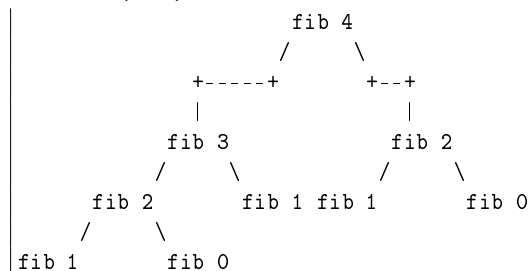
- Definición de Fibonacci por divide y vencerás.

```
fib 0 = 0
```

```
fib 1 = 1
```

```
fib n = fib (n-1) + fib (n-2)
```

- Cálculo de (fib 4) por divide y vencerás



Calcula 2 veces (fib 2) y 3 veces (fib 1) y (fib 0).

Cálculo de Fibonacci por programación dinámica

- Cálculo de (fib 4) por programación dinámica

```
fib 0
|
|   fib 1
|   |
+-----+=== fib 2
      |   |
      +-----+=== fib 3
            |   |
            +-----+=== fib 4
```

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica

Introducción a la programación dinámica

El patrón de la programación dinámica

2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica

3. Producto de cadenas de matrices (PCM)

4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)

5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo(CM)

6. Problema del viajante (PV)

El patrón de la programación dinámica

- ▶ Cabecera del módulo:

```
module Dinamica (module Tabla, dinamica) where
```

- ▶ Librerías auxiliares

```
-- Hay que elegir una implementación de TAD Tabla  
-- import TablaConFunciones as Tabla  
import TablaConListasDeAsociacion as Tabla  
-- import TablaConMatrices as Tabla  
  
import Data.Array
```

El patrón de la programación dinámica

- ▶ El patrón de la programación dinámica

```
dinamica :: Ix i => (Tabla i v -> i -> v) -> (i,i)
              -> Tabla i v
dinamica calcula cotas = t
  where t = tabla [(i,calcula t i) | i <- range cotas]
```

- ▶ `(calcula t i)` es el valor del índice `i` calculado a partir de los anteriores que ya se encuentran en la tabla `t`.
- ▶ `cotas` son las cotas de la matriz `t` en la que se almacenan los valores calculados.

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica
2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
 - Definición de Fibonacci mediante programación dinámica
3. Producto de cadenas de matrices (PCM)
4. Árboles binarios de búsqueda óptimas (ABBO)
5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo (CM)
6. Problema del viajante (PV)

Definición de Fibonacci mediante programación dinámica

- ▶ Importación del patrón de programación dinámica

```
import Dinamica
```

- ▶ `(fib n)` es el n -ésimo término de la sucesión de Fibonacci, calculado mediante programación dinámica. Por ejemplo,

```
| fib 8 ~> 21
```

```
fib :: Int -> Int  
fib n = valor t n  
  where t = dinamica calculaFib (cotasFib n)
```

Definición de Fibonacci mediante programación dinámica

- `(calculaFib t i)` es el valor de i -ésimo término de la sucesión de Fibonacci calculado mediante la tabla `t` que contiene los anteriores. Por ejemplo,

```
calculaFib (tabla []) 0           ~ 0
calculaFib (tabla [(0,0),(1,1),(2,1),(3,2)]) 4 ~ 3
```

Además,

```
ghci> dinamica calculaFib (0,6)
Tbl [(0,0),(1,1),(2,1),(3,2),(4,3),(5,5),(6,8)]
```

```
calculaFib :: Tabla Int Int -> Int -> Int
```

```
calculaFib t i
```

```
  | i <= 1    = i
```

```
  | otherwise = valor t (i-1) + valor t (i-2)
```

Definición de Fibonacci mediante programación dinámica

- `(calculaFib t i)` es el valor de i -ésimo término de la sucesión de Fibonacci calculado mediante la tabla `t` que contiene los anteriores. Por ejemplo,

```
calculaFib (tabla []) 0           ~ 0
calculaFib (tabla [(0,0),(1,1),(2,1),(3,2)]) 4 ~ 3
```

Además,

```
ghci> dinamica calculaFib (0,6)
Tbl [(0,0),(1,1),(2,1),(3,2),(4,3),(5,5),(6,8)]
```

```
calculaFib :: Tabla Int Int -> Int -> Int
```

```
calculaFib t i
```

```
  | i <= 1    = i
```

```
  | otherwise = valor t (i-1) + valor t (i-2)
```

Definición de Fibonacci mediante programación dinámica

- ▶ `(cotasFib n)` son las cotas del vector que se necesita para calcular el n -ésimo término de la sucesión de Fibonacci mediante programación dinámica.

```
cotasFib :: Int -> (Int,Int)
cotasFib n = (0,n)
```

Definición de Fibonacci mediante programación dinámica

- ▶ `(cotasFib n)` son las cotas del vector que se necesita para calcular el n -ésimo término de la sucesión de Fibonacci mediante programación dinámica.

```
cotasFib :: Int -> (Int,Int)
```

```
cotasFib n = (0,n)
```

- └ Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
 - └ Definición de Fibonacci mediante programación dinámica

Definición de Fibonacci mediante divide y vencerás

- ▶ `(fibR n)` es el n -ésimo término de la sucesión de Fibonacci calculado mediante divide y vencerás.

```
fibR :: Int -> Int
fibR 0 = 0
fibR 1 = 1
fibR n = fibR (n-1) + fibR (n-2)
```

- ▶ Comparación:

```
ghci> fib 30
832040
(0.01 secs, 0 bytes)
ghci> fibR 30
832040
(6.46 secs, 222602404 bytes)
```


Definición de Fibonacci mediante evaluación perezosa

- `fibs` es la lista de los términos de la sucesión de Fibonacci. Por ejemplo,

```
| take 10 fibs  ~>  [0,1,1,2,3,5,8,13,21,34]
```

```
fibs :: [Int]
```

```
fibs = 0:1:[x+y | (x,y) <- zip fibs (tail fibs)]
```

- `(fib' n)` es el n-ésimo término de la sucesión de Fibonacci, calculado a partir de `fibs`. Por ejemplo,

```
| fib' 8  ~>  21
```

```
fib' :: Int -> Int
```

```
fib' n = fibs!!n
```

Definición de Fibonacci mediante evaluación perezosa

► Comparaciones:

```
ghci> fib 30
832040
(0.02 secs, 524808 bytes)
ghci> fib' 30
832040
(0.01 secs, 542384 bytes)
ghci> fibR 30
832040
(6.46 secs, 222602404 bytes)
```

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica
2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
3. Producto de cadenas de matrices (PCM)
 - Descripción del problema PCM
 - Solución del PCM mediante programación dinámica
 - Solución del PCM mediante divide y vencerás
4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)
5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo (CM)

Descripción del problema

- ▶ Para multiplicar una matriz de orden $m * p$ y otra de orden $p * n$ se necesitan mnp multiplicaciones de elementos.
- ▶ El problema del producto de una cadena de matrices (en inglés, “matrix chain multiplication”) consiste en dada una sucesión de matrices encontrar la manera de multiplicarlas usando el menor número de productos de elementos.
- ▶ Ejemplo: Dada la sucesión de matrices

$$A(30 \times 1), B(1 \times 40), C(40 \times 10), D(10 \times 25)$$

las productos necesarios en las posibles asociaciones son

$$((AB)C)D \quad 30 \times 1 \times 40 + 30 \times 40 \times 10 + 30 \times 10 \times 25 = 20700$$

$$A(B(CD)) \quad 40 \times 10 \times 25 + 1 \times 40 \times 25 + 30 \times 1 \times 25 = 11750$$

$$(AB)(CD) \quad 30 \times 1 \times 40 + 40 \times 10 \times 25 + 30 \times 40 \times 25 = 41200$$

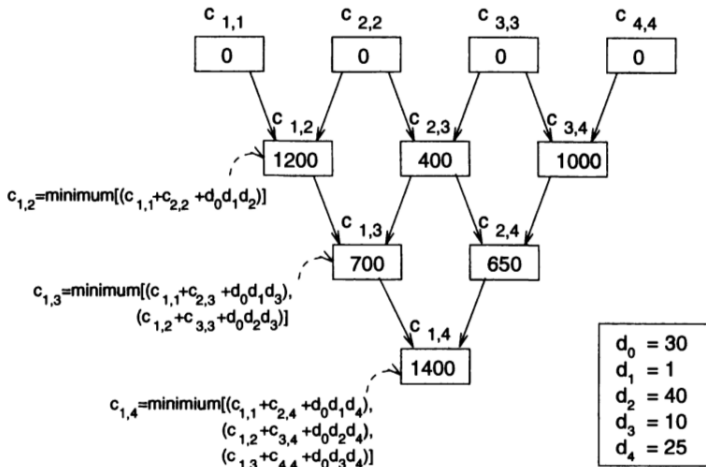
$$A((BC)D) \quad 1 \times 40 \times 10 + 1 \times 10 \times 25 + 30 \times 1 \times 25 = 1400$$

$$(A(BC))D \quad 1 \times 40 \times 10 + 30 \times 1 \times 10 + 30 \times 10 \times 25 = 8200$$

El algoritmo del PCM

- ▶ El PCM correspondiente a la sucesión d_0, \dots, d_n consiste en encontrar la manera de multiplicar una sucesión de matrices A_1, \dots, A_n (tal que el orden de A_i es $d_{i-1} \times d_i$) usando el menor número de productos de elementos.
- ▶ Sea $c_{i,j}$ el mínimo número de multiplicaciones necesarias para multiplicar la cadena A_i, \dots, A_j ($1 \leq i \leq j \leq n$).
- ▶ Relación de recurrencia de $c_{i,j}$:
$$c_{i,i} = 0$$
$$c_{i,j} = \text{minimo}\{c_{i,k} + c_{k+1,j} + d_{i-1}d_kd_j \mid i \leq k < j\}$$
- ▶ La solución del problema es $c_{1,n}$.

El algoritmo del PCM



Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica

2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica

3. Producto de cadenas de matrices (PCM)

Descripción del problema PCM

Solución del PCM mediante programación dinámica

Solución del PCM mediante divide y vencerás

4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)

5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo (CM)

6. Dijkstra (D)

Solución del PCM mediante programación dinámica

- Importación de librerías auxiliares:

```
import Dinamica
```

- `Cadena` representa el producto de una cadena de matrices. Por ejemplo,

$$\begin{array}{l} P (A 1) (P (A 2) (A 3)) \rightsquigarrow (A1*(A2*A3)) \\ P (P (A 1) (A 2)) (A 3) \rightsquigarrow ((A1*A2)*A3) \end{array}$$

```
data Cadena = A Int
            | P Cadena Cadena
```

```
instance Show Cadena where
  show (A x)      = "A" ++ show x
  show (P p1 p2) = concat ["(", show p1, "*,", show p2, ")"]
```

Solución del PCM mediante programación dinámica

- ▶ Los índices de la matriz de cálculo son de la forma (i, j) y sus valores (v, k) donde v es el mínimo número de multiplicaciones necesarias para multiplicar la cadena A_i, \dots, A_j y k es la posición donde dividir la cadena de forma óptima.

```
type IndicePCM = (Int,Int)
```

```
type ValorPCM  = (Int,Int)
```

Solución del PCM mediante programación dinámica

- `(pcm ds)` es el par formado por el mínimo número de multiplicaciones elementales para multiplicar una sucesión de matrices A_1, \dots, A_n (tal que el orden de A_i es $d_{i-1} \times d_i$ y $ds = [d_0, \dots, d_n]$). Por ejemplo,

`| pcm [30, 1, 40, 10, 25] \rightsquigarrow (1400, (A1*((A2*A3)*A4)))`

```
pcm :: [Int] -> (Int, Cadena)
```

```
pcm ds = (v, cadena t 1 n)
```

```
    where n      = length ds - 1
```

```
          t      = dinamica (calculaPCM ds) (cotasPCM n)
```

```
          (v,_) = valor t (1,n)
```

Solución del PCM mediante programación dinámica

- `(pcm ds)` es el par formado por el mínimo número de multiplicaciones elementales para multiplicar una sucesión de matrices A_1, \dots, A_n (tal que el orden de A_i es $d_{i-1} \times d_i$ y $ds = [d_0, \dots, d_n]$). Por ejemplo,

`| pcm [30, 1, 40, 10, 25] ~> (1400, (A1*((A2*A3)*A4))`

```
pcm :: [Int] -> (Int, Cadena)
```

```
pcm ds = (v, cadena t 1 n)
```

```
    where n      = length ds - 1
```

```
          t      = dinamica (calculaPCM ds) (cotasPCM n)
```

```
          (v,_) = valor t (1,n)
```

Solución del PCM mediante programación dinámica

- `(calculaPCM ds t (i,j))` es el valor del índice `(i,j)` calculado a partir de la lista `ds` de dimensiones de las matrices y la tabla `t` de valores previamente calculados.

```

calculaPCM :: [Int] -> Tabla IndicePCM ValorPCM
            -> IndicePCM -> ValorPCM

calculaPCM ds t (i,j)
  | i == j      = (0,i)
  | otherwise =
      minimum [(fst(valor t (i,k))
                + fst(valor t (k+1,j))
                + ds!!(i-1) * ds!!k * ds!!j, k)
              | k <- [i..j-1]]

```

Solución del PCM mediante programación dinámica

- `(calculaPCM ds t (i,j))` es el valor del índice `(i,j)` calculado a partir de la lista `ds` de dimensiones de las matrices y la tabla `t` de valores previamente calculados.

```
calculaPCM :: [Int] -> Tabla IndicePCM ValorPCM
           -> IndicePCM -> ValorPCM
```

```
calculaPCM ds t (i,j)
  | i == j      = (0,i)
  | otherwise =
      minimum [(fst(valor t (i,k))
                + fst(valor t (k+1,j))
                + ds!!(i-1) * ds!!k * ds!!j, k)
              | k <- [i..j-1]]
```

Solución del PCM mediante programación dinámica

- `(cotasPCM n)` son las cotas de los índices para el producto de una cadena de n matrices.

```
cotasPCM :: Int -> (IndicePCM,IndicePCM)
cotasPCM n = ((1,1),(n,n))
```

- `(cadena t i j)` es la cadena que resultar de agrupar las matrices A_i, \dots, A_j según los valores de la tabla t .

```
cadena :: Tabla IndicePCM ValorPCM -> Int -> Int -> Cadena
cadena t i j
  | i == j-1  = P (A i) (A j)
  | k == i    = P (A i) (cadena t (i+1) j)
  | k == j-1 = P (cadena t i (j-1)) (A j)
  | otherwise = P (cadena t i (k-1)) (cadena t k j)
  where (_,k) = valor t (i,j)
```

Solución del PCM mediante programación dinámica

- `(cotasPCM n)` son las cotas de los índices para el producto de una cadena de n matrices.

```
cotasPCM :: Int -> (IndicePCM,IndicePCM)
cotasPCM n = ((1,1),(n,n))
```

- `(cadena t i j)` es la cadena que resultar de agrupar las matrices A_i, \dots, A_j según los valores de la tabla t .

```
cadena :: Tabla IndicePCM ValorPCM -> Int -> Int -> Cadena
cadena t i j
  | i == j-1  = P (A i) (A j)
  | k == i    = P (A i) (cadena t (i+1) j)
  | k == j-1  = P (cadena t i (j-1)) (A j)
  | otherwise = P (cadena t i (k-1)) (cadena t k j)
  where (_,k) = valor t (i,j)
```

Solución del PCM mediante programación dinámica

- ▶ `(cotasPCM n)` son las cotas de los índices para el producto de una cadena de n matrices.

```
cotasPCM :: Int -> (IndicePCM,IndicePCM)
cotasPCM n = ((1,1),(n,n))
```

- ▶ `(cadena t i j)` es la cadena que resultar de agrupar las matrices A_i, \dots, A_j según los valores de la tabla t .

```
cadena :: Tabla IndicePCM ValorPCM -> Int -> Int -> Cadena
cadena t i j
  | i == j-1  = P (A i) (A j)
  | k == i    = P (A i) (cadena t (i+1) j)
  | k == j-1  = P (cadena t i (j-1)) (A j)
  | otherwise = P (cadena t i (k-1)) (cadena t k j)
  where (_,k) = valor t (i,j)
```


Solución del PCM mediante programación dinámica

- `(pcm' ds)` es la lista de los índices y valores usados en el cálculo del mínimo número de multiplicaciones necesarias para multiplicar una sucesión de matrices A_1, \dots, A_n (tal que el orden de A_i es $d_{i-1} \times d_i$ y $ds = [d_0, \dots, d_n]$). Por ejemplo,

```
ghci> pcm' [30,1,40,10,25]
[((1,1),(0,1)),((1,2),(1200,1)),((1,3),(700,1)),((1,4),(1400,1)),
 ((2,2),(0,2)),((2,3),(400,2)),((2,4),(650,3)),
 ((3,3),(0,3)),((3,4),(10000,3)),
 ((4,4),(0,4))]
```

```
pcm' :: [Int] -> [((Int, Int), ValorPCM)]
pcm' ds = [((i,j),valor t (i,j)) | i <- [1..n], j <- [i..n]]
  where n = length ds - 1
        t = dinamica (calculaPCM ds) (cotasPCM n)
```

Solución del PCM mediante programación dinámica

- `(pcm' ds)` es la lista de los índices y valores usados en el cálculo del mínimo número de multiplicaciones necesarias para multiplicar una sucesión de matrices A_1, \dots, A_n (tal que el orden de A_i es $d_{i-1} \times d_i$ y $ds = [d_0, \dots, d_n]$). Por ejemplo,

```
ghci> pcm' [30,1,40,10,25]
[((1,1),(0,1)),((1,2),(1200,1)),((1,3),(700,1)),((1,4),(1400,1))
 ((2,2),(0,2)),((2,3),(400,2)),((2,4),(650,3)),
 ((3,3),(0,3)),((3,4),(10000,3)),
 ((4,4),(0,4))]
```

```
pcm' :: [Int] -> [((Int, Int), ValorPCM)]
pcm' ds = [((i,j),valor t (i,j)) | i <- [1..n], j <- [i..n]]
  where n = length ds - 1
        t = dinamica (calculaPCM ds) (cotasPCM n)
```

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica

2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica

3. Producto de cadenas de matrices (PCM)

Descripción del problema PCM

Solución del PCM mediante programación dinámica

Solución del PCM mediante divide y vencerás

4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)

5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo (CM)

6. Dijkstra (D)

Solución del PCM mediante divide y vencerás

- `(pcmDyV ds)` es la solución del PCM correspondiente a `ds` mediante divide y vencerás. Por ejemplo,

$$\text{pcmDyV } [30, 1, 40, 10, 25] \rightsquigarrow (1040, (A1 * ((A2 * A3) * A4)))$$

```
pcmDyV :: [Int] -> (Int, Cadena)
```

```
pcmDyV ds = cadenaDyV ds 1 n
```

```
  where n = length ds - 1
```

Solución del PCM mediante divide y vencerás

- `(pcmDyV ds)` es la solución del PCM correspondiente a `ds` mediante divide y vencerás. Por ejemplo,

$$\text{pcmDyV } [30, 1, 40, 10, 25] \rightsquigarrow (1040, (A1 * ((A2 * A3) * A4)))$$

```
pcmDyV :: [Int] -> (Int, Cadena)
```

```
pcmDyV ds = cadenaDyV ds 1 n
```

```
  where n = length ds - 1
```

Solución del PCM mediante divide y vencerás

- `cadenaDyV ds i j` es la solución del PCM correspondiente a $[d_i, \dots, d_j]$. Por ejemplo,

```
cadenaDyV [30,1,40,10,25] 1 4 ~> (1040, (A1*((A2*A3)*A4)))
cadenaDyV [30,1,40,10,25] 2 4 ~> (650, ((A2*A3)*A4))
```

```
cadenaDyV :: [Int] -> Int -> Int -> (Int, Cadena)
cadenaDyV ds i j
  | i == j      = (0, A i)
  | i == j-1   = (ds!!(i-1)*ds!!i*ds!!j, P (A i) (A j))
  | k == i     = (v, P (A i) (subcadena (i+1) j))
  | k == j-1   = (v, P (subcadena i (j-1)) (A j))
  | otherwise  = (v, P (subcadena i (k-1)) (subcadena k j))
  where (v,k) = minimum [(valor i k
                          + (valor (k+1) j)
                          + ds!!(i-1) * ds!!k * ds!!j, k)
                        | k <- [i..j-1]]
  valor p q    = fst (cadenaDyV ds p q)
  subcadena p q = snd (cadenaDyV ds p q)
```

Solución del PCM mediante divide y vencerás

- `cadenaDyV ds i j` es la solución del PCM correspondiente a $[d_i, \dots, d_j]$. Por ejemplo,

```
cadenaDyV [30,1,40,10,25] 1 4 ~> (1040, (A1*((A2*A3)*A4)))
cadenaDyV [30,1,40,10,25] 2 4 ~> (650, ((A2*A3)*A4))
```

```
cadenaDyV :: [Int] -> Int -> Int -> (Int, Cadena)
cadenaDyV ds i j
  | i == j      = (0, A i)
  | i == j-1   = (ds!!(i-1)*ds!!i*ds!!j, P (A i) (A j))
  | k == i     = (v, P (A i) (subcadena (i+1) j))
  | k == j-1   = (v, P (subcadena i (j-1)) (A j))
  | otherwise  = (v, P (subcadena i (k-1)) (subcadena k j))
  where (v,k) = minimum [(valor i k)
                        + (valor (k+1) j)
                        + ds!!(i-1) * ds!!k * ds!!j, k)
                        | k <- [i..j-1]]
  valor p q    = fst (cadenaDyV ds p q)
  subcadena p q = snd (cadenaDyV ds p q)
```

Comparación de los métodos de solucionar el PCM

```
ghci> :set +s
```

```
ghci> fst (pcm [1..20])
```

```
2658
```

```
(0.04 secs, 4144552 bytes)
```

```
ghci> fst (pcmDyV [1..20])
```

```
2658
```

```
(1582.60 secs, 340414297896 bytes)
```


Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica
2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
3. Producto de cadenas de matrices (PCM)
4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)
 - Descripción del problema de ABBO
 - Solución del ABBO mediante programación dinámica
5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo(CM)
6. Problema del viajante (PV)

Descripción del problema de ABBO

- ▶ Para cada clave c_i , sea p_i la probabilidad de acceso a c_i .
- ▶ Un árbol binario de búsqueda es optimal (ABBO) si la media del número de comparaciones para todas las claves

$$a(T) = \sum d_i p_i$$

donde d_i es la distancia de la clave c_i a la raíz (es decir, el número de comparaciones necesarias para llegar a c_i), es mínima.

El algoritmo del ABBO

- ▶ Sea $c_{i,j}$ el mínimo valor $a(T)$ cuando el árbol T contiene las claves c_i, \dots, c_j .
- ▶ Relación de recurrencia para calcular $c_{i,j}$:
 - ▶ Si $i > j$, $c_{i,j} = 0$.
 - ▶ Si $i = j$, $c_{i,j} = p_i$.
 - ▶ Si $i < j$,

$$c_{i,j} = \min_{i \leq k \leq j} \left((c_{i,k-1} + \sum_{l=i}^{l=k-1} p_l) + (c_{k+1,j} + \sum_{l=k+1}^{l=j} p_l) + p_k \right)$$

- ▶ El tercer caso puede simplificarse

$$c_{i,j} = \min_{i \leq k \leq j} (c_{i,k-1} + c_{k+1,j}) + \sum_{l=i}^{l=j} p(l)$$

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica
2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
3. Producto de cadenas de matrices (PCM)
4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)
 - Descripción del problema de ABBO
 - Solución del ABBO mediante programación dinámica
5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo(CM)
6. Problema del viajante (PV)

Solución del ABBO mediante programación dinámica

- ▶ En la matriz de cálculo del ABBO el valor (v, k) correspondiente al índice (i, j) indica que v es el mínimo valor $a(T)$ cuando el árbol T contiene las claves c_i, \dots, c_j y que la división óptima se obtiene dividiendo las claves en dos mediante c_k .

```
type Indice = (Int,Int)
type Valor  = (Float,Int)
```

- ▶ (ABB a) es el tipo de los árboles binarios de búsqueda sobre a.

```
data ABB a = Vacio
           | Nodo a (ABB a) (ABB a)
           deriving Show
```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

- ▶ `(abbo cs ps)` es el par formado por un ABBO correspondiente a la lista de claves `cs` cuyas correspondientes probabilidades de acceso son los elementos de la lista `ps` y por su valor. Por ejemplo,

```
ghci> abbo ejProblema
(Nodo 4 (Nodo 1 Vacio
        (Nodo 3 Vacio Vacio))
 (Nodo 10
  (Nodo 8 Vacio Vacio)
  (Nodo 15
   (Nodo 11 Vacio Vacio)
   Vacio)),
2.15)
```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

► Definición de abbo:

```
abbo :: Problema -> (ABB Int,Float)
abbo pb = (solucion c t (1,n) , fst (valor t (1,n)))
  where (cs,ps) = pb
        n      = length ps
        c      = listArray (1,n) cs
        p      = listArray (1,n) ps
        t      = dinamica (calcula p) (cotas n)
```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

► Definición de abbo:

```
abbo :: Problema -> (ABB Int,Float)
abbo pb = (solucion c t (1,n) , fst (valor t (1,n)))
  where (cs,ps) = pb
        n      = length ps
        c      = listArray (1,n) cs
        p      = listArray (1,n) ps
        t      = dinamica (calcula p) (cotas n)
```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

- `(calcula p t (i,j))` es el valor del índice (i,j) donde p es el vector de probabilidades y t es la tabla calculada hasta el momento.

```
calcula :: Array Int Float -> Tabla Indice Valor
        -> Indice -> Valor
calcula p t (i,j)
  | i > j      = (0.0,0)
  | i == j    = (p!i,i)
  | otherwise = suma1 (minimum [(fst(valor t (i,k-1))
                               + fst(valor t (k+1,j))),
                               | k <- [i..j]])
                    (sumaSegmento i j p)
  where suma1 (x,y) z = (x+z,y)
```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

- $(\text{calcula } p \ t \ (i,j))$ es el valor del índice (i,j) donde p es el vector de probabilidades y t es la tabla calculada hasta el momento.

```

calcula :: Array Int Float -> Tabla Indice Valor
        -> Indice -> Valor
calcula p t (i,j)
  | i > j      = (0.0,0)
  | i == j    = (p!i,i)
  | otherwise = suma1 (minimum [(fst(valor t (i,k-1))
                               + fst(valor t (k+1,j))),
                               | k <- [i..j]])
                    (sumaSegmento i j p)
  where suma1 (x,y) z = (x+z,y)

```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

- ▶ (`sumaSegmento i j p`) es la suma de los valores de los elementos del vector `p` desde la posición `i` a la `j`. Por ejemplo,

```
| > sumaSegmento 2 4 (array (1,5)
|                                     [(i,fromIntegral i/2) | i <- [1..5]])
| 4.5
```

```
sumaSegmento :: Int -> Int -> Array Int Float -> Float
sumaSegmento i j p = sum [p!l | l <- [i..j]]
```

- ▶ (`cotas n`) son las cotas de la matriz reversaria para resolver el problema del árbol de búsqueda minimal óptimo con `n` claves.

```
cotas :: Int -> ((Int,Int),(Int,Int))
cotas n = ((1,0),(n+1,n))
```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

- ▶ (`sumaSegmento i j p`) es la suma de los valores de los elementos del vector `p` desde la posición `i` a la `j`. Por ejemplo,

```
| > sumaSegmento 2 4 (array (1,5)
|                                     [(i,fromIntegral i/2) | i <- [1..5]])
| 4.5
```

```
sumaSegmento :: Int -> Int -> Array Int Float -> Float
sumaSegmento i j p = sum [p!l | l <- [i..j]]
```

- ▶ (`cotas n`) son las cotas de la matriz revesaria para resolver el problema del árbol de búsqueda minimal óptimo con `n` claves.

```
cotas :: Int -> ((Int,Int),(Int,Int))
cotas n = ((1,0),(n+1,n))
```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

- ▶ `(sumaSegmento i j p)` es la suma de los valores de los elementos del vector `p` desde la posición `i` a la `j`. Por ejemplo,

```
| > sumaSegmento 2 4 (array (1,5)
|                                     [(i,fromIntegral i/2) | i <- [1..5]])
| 4.5
```

```
sumaSegmento :: Int -> Int -> Array Int Float -> Float
sumaSegmento i j p = sum [p!l | l <- [i..j]]
```

- ▶ `(cotas n)` son las cotas de la matriz revesaria para resolver el problema del árbol de búsqueda minimal óptimo con `n` claves.

```
cotas :: Int -> ((Int,Int),(Int,Int))
cotas n = ((1,0),(n+1,n))
```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

- `(solucion cs c (i,j))` es el ABBO correspondiente a las claves `c(i),...,c(j)` a partir de la tabla de cálculo `t`.

```
solucion :: Array Int Int -> Tabla Indice Valor  
          -> Indice -> ABB Int  
solucion cs t (i,j)  
    | i > j      = Vacio  
    | i == j    = Nodo c Vacio Vacio  
    | otherwise = Nodo c (solucion cs t (i,k-1))  
                        (solucion cs t (k+1,j))  
  where (_,k) = valor t (i,j)  
        c     = cs ! k
```

Solución del ABBO mediante programación dinámica

- `(solucion cs c (i,j))` es el ABBO correspondiente a las claves $c(i), \dots, c(j)$ a partir de la tabla de cálculo `t`.

```

solucion :: Array Int Int -> Tabla Indice Valor
          -> Indice -> ABB Int
solucion cs t (i,j)
  | i > j      = Vacio
  | i == j    = Nodo c Vacio Vacio
  | otherwise = Nodo c (solucion cs t (i,k-1))
                      (solucion cs t (k+1,j))
  where (_,k) = valor t (i,j)
        c     = cs ! k

```

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica
2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
3. Producto de cadenas de matrices (PCM)
4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)
5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo(CM)
 - Descripción del problema
 - Solución del problema de los caminos mínimos (CM)
6. Problema del viajante (PV)

Descripción del problema

- ▶ Cálculo de los caminos de coste mínimo entre todos los pares de nodos de un grafo no dirigido.
- ▶ Notación:
 - ▶ $c_{i,j}$ es el mínimo coste del camino del vértice i al j .
 - ▶ $p_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{si } i = j \\ \text{peso del arco entre } i \text{ y } j, & \text{si } i \neq j \text{ y hay arco de } i \text{ a } j \\ \infty, & \text{en otro caso} \end{cases}$
 - ▶ $c_{i,j,k}$ es el mínimo coste del camino del vértice i al j , usando los vértices $1, \dots, k$.
- ▶ Relación de recurrencia para calcular $c_{i,j}$:
 - ▶ $c_{i,j,0} = p_{i,j}$
 - ▶ $c_{i,j,k} = \min\{c_{i,j,k-1}, c_{i,k,k-1} + c_{k,j,k-1}\}$
- ▶ El algoritmo se conoce como el algoritmo de Floyd.

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica
2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
3. Producto de cadenas de matrices (PCM)
4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)
5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo(CM)
 - Descripción del problema
 - Solución del problema de los caminos mínimos (CM)
6. Problema del viajante (PV)

Solución del CM mediante programación dinámica

- ▶ Importación de librerías auxiliares:

```
import Dinamica
```

```
-- Nota: Elegir una implementación de los grafos.
```

```
import GrafoConVectorDeAdyacencia
```

```
-- import GrafoConMatrizDeAdyacencia
```

Solución del CM mediante programación dinámica

- Ejemplos de grafos para el problema:

```

ej1Grafo :: Grafo Int Int
ej1Grafo = creaGrafo True (1,6)
              [(i,j,(v!!(i-1))!!(j-1))
               | i <- [1..6], j <- [1..6]]

```

```

v :: [[Int]]
v = [[ 0,  4,  1,  6,100,100],
      [ 4,  0,  1,100,  5,100],
      [ 1,  1,  0,100,  8,  2],
      [ 6,100,100,  0,100,  2],
      [100,  5,  8,100,  0,  5],
      [100,100,  2,  2,  5,  0]]

```

Solución del CM mediante programación dinámica

- Ejemplos de grafos para el problema:

```
ej2Grafo :: Grafo Int Int
ej2Grafo = creaGrafo True (1,6)
              [(i,j,(v'!!(i-1))!!(j-1))
               | i <- [1..6], j <- [1..6]]
```

```
v' :: [[Int]]
v' = [[ 0,  4,100,100,100,  2],
       [ 1,  0,  3,  4,100,100],
       [ 6,  3,  0,  7,100,100],
       [ 6,100,100,  0,  2,100],
       [100,100,100,  5,  0,100],
       [100,100,100,  2,  3,  0]]
```

Solución del CM mediante programación dinámica

- ▶ En la matriz del cálculo del camino mínimo, los índices son de la forma (i, j, k) y los valores de la forma (v, xs) representando que el camino mínimo desde el vértice i al j usando los vértices $1, \dots, k$ tiene un coste v y está formado por los vértices xs .

```
type IndiceCM = (Int,Int,Int)
```

```
type ValorCM  = (Int,[Int])
```

Solución del CM mediante programación dinámica

- (`caminosMinimos g`) es la lista de los caminos mínimos entre todos los nodos del grafo `g` junto con sus costes. Por ejemplo,

```
ghci> caminosMinimos ej1Grafo
[((1,2),(2,[1,3,2])), ((1,3),(1,[1,3])), ((1,4),(5,[1,3,6,4])),
 ((1,5),(7,[1,3,2,5])),((1,6),(3,[1,3,6])),((2,3),(1,[2,3])),
 ((2,4),(5,[2,3,6,4])),((2,5),(5,[2,5])), ((2,6),(3,[2,3,6])),
 ((3,4),(4,[3,6,4])), ((3,5),(6,[3,2,5])),((3,6),(2,[3,6])),
 ((4,5),(7,[4,6,5])), ((4,6),(2,[4,6])), ((5,6),(5,[5,6]))]
```

```
caminosMinimos :: (Grafo Int Int) -> [((Int,Int), ValorCM)]
```

```
caminosMinimos g =
```

```
  [((i,j), valor t (i,j,n)) | i <- [1..n], j <- [i+1..n]]
```

```
  where n = length (nodos g)
```

```
        t = dinamica (calculaCM g) (cotasCM n)
```

Solución del CM mediante programación dinámica

- (`caminosMinimos g`) es la lista de los caminos mínimos entre todos los nodos del grafo `g` junto con sus costes. Por ejemplo,

```
ghci> caminosMinimos ej1Grafo
[((1,2),(2,[1,3,2])), ((1,3),(1,[1,3])), ((1,4),(5,[1,3,6,4])),
 ((1,5),(7,[1,3,2,5])),((1,6),(3,[1,3,6])),((2,3),(1,[2,3])),
 ((2,4),(5,[2,3,6,4])),((2,5),(5,[2,5])), ((2,6),(3,[2,3,6])),
 ((3,4),(4,[3,6,4])), ((3,5),(6,[3,2,5])),((3,6),(2,[3,6])),
 ((4,5),(7,[4,6,5])), ((4,6),(2,[4,6])), ((5,6),(5,[5,6]))]
```

```
caminosMinimos :: (Grafo Int Int) -> [((Int,Int), ValorCM)]
```

```
caminosMinimos g =
```

```
  [((i,j), valor t (i,j,n)) | i <- [1..n], j <- [i+1..n]]
```

```
  where n = length (nodos g)
```

```
        t = dinamica (calculaCM g) (cotasCM n)
```

Solución del CM mediante programación dinámica

- (`calculaCM g t (i,j,k)`) es el valor del camino mínimo desde el vértice `i` al `j` usando los vértices `1, ..., k` del grafo `g` y la tabla `t` de los valores anteriores al índice `(i,j,k)`.

```

calculaCM :: (Grafo Int Int) -> Tabla IndiceCM ValorCM
           -> IndiceCM -> ValorCM
calculaCM g t (i,j,k)
  | k==0      = (peso i j g, if i==j then [i] else [i,j])
  | v1<=v2    = (v1,p)
  | otherwise = (v2,p1++p2)
where (v1,p)   = valor t (i,j,k-1)
      (a,p1)   = valor t (i,k,k-1)
      (b, _:p2) = valor t (k,j,k-1)
      v2 = a+b

```

Solución del CM mediante programación dinámica

- $(\text{calculaCM } g \ t \ (i,j,k))$ es el valor del camino mínimo desde el vértice i al j usando los vértices $1, \dots, k$ del grafo g y la tabla t de los valores anteriores al índice (i,j,k) .

```

calculaCM :: (Grafo Int Int) -> Tabla IndiceCM ValorCM
           -> IndiceCM -> ValorCM
calculaCM g t (i,j,k)
  | k==0      = (peso i j g, if i==j then [i] else [i,j])
  | v1<=v2    = (v1,p)
  | otherwise = (v2,p1++p2)
where (v1,p)   = valor t (i,j,k-1)
      (a,p1)   = valor t (i,k,k-1)
      (b, _:p2) = valor t (k,j,k-1)
      v2 = a+b

```

Solución del CM mediante programación dinámica

- ▶ (cotasCM n) son las cotas de la matriz para resolver el problema de los caminos mínimos en un grafo con n nodos.

```
cotasCM :: Int -> ((Int,Int,Int), (Int,Int,Int))  
cotasCM n = ((1,1,0), (n,n,n))
```

Solución del CM mediante programación dinámica

- ▶ `(cotasCM n)` son las cotas de la matriz para resolver el problema de los caminos mínimos en un grafo con `n` nodos.

```
cotasCM :: Int -> ((Int,Int,Int), (Int,Int,Int))  
cotasCM n = ((1,1,0), (n,n,n))
```

- └ Problema del viajante (PV)
- └ Descripción del problema

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica
2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
3. Producto de cadenas de matrices (PCM)
4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)
5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo (CM)
6. Problema del viajante (PV)
 - Descripción del problema
 - Solución del problema del viajante (PV)

Descripción del problema

- ▶ Dado un grafo no dirigido con pesos encontrar una camino en el grafo que visite todos los nodos exactamente una vez y cuyo coste sea mínimo.
- ▶ Notación:
 - ▶ Los vértices del grafo son $1, 2, \dots, n$.
 - ▶ $p_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{si } i = j \\ \text{peso del arco entre } i \text{ y } j, & \text{si } i \neq j \text{ y hay arco de } i \text{ a } j \\ \infty, & \text{en otro caso} \end{cases}$
 - ▶ El vértice inicial y final es el n .
 - ▶ $c_{i,S}$ es el camino más corto que comienza en i , termina en n y pasa exactamente una vez por cada uno de los vértices del conjunto S .
- ▶ Relación de recurrencia de $c_{i,S}$:
 - ▶ $c_{i,\emptyset} = p_{i,n}$, si $i \neq n$.
 - ▶ $c_{i,S} = \min\{p_{i,j} + c_{j,S-\{j\}} : j \in S\}$, si $i \neq n$, $i \notin S$.
- ▶ La solución es $c_{n,\{1,\dots,n-1\}}$.

Tema 24: Técnicas de diseño ascendente de algoritmos

1. Programación dinámica
2. Fibonacci como ejemplo de programación dinámica
3. Producto de cadenas de matrices (PCM)
4. Árboles binarios de búsqueda optimales (ABBO)
5. Caminos mínimos entre todos los pares de nodos de un grafo(CM)
6. Problema del viajante (PV)
 - Descripción del problema
 - Solución del problema del viajante (PV)

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ Importación de librerías auxiliares

```
import Dinamica
```

```
-- Nota: Elegir una implementación de los grafos.
```

```
import GrafoConVectorDeAdyacencia
```

```
-- import GrafoConMatrizDeAdyacencia
```

- ▶ Nota: Para el PV se usará la representación de los de conjuntos de enteros como números enteros que se describe a continuación.
- ▶ Los conjuntos se representan por números enteros.

```
type Conj = Int
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- `(conj2Lista c)` es la lista de los elementos del conjunto `c`. Por ejemplo,

```
conj2Lista 24  ~>  [3,4]
conj2Lista 30  ~>  [1,2,3,4]
conj2Lista 22  ~>  [1,2,4]
```

```
conj2Lista :: Conj -> [Int]
conj2Lista s = c2l s 0
  where
    c2l 0 _ = []
    c2l n i | odd n     = i : c2l (n `div` 2) (i+1)
            | otherwise = c2l (n `div` 2) (i+1)
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- (`conj2Lista c`) es la lista de los elementos del conjunto `c`. Por ejemplo,

```

conj2Lista 24  ~>  [3,4]
conj2Lista 30  ~>  [1,2,3,4]
conj2Lista 22  ~>  [1,2,4]

```

```

conj2Lista :: Conj -> [Int]

```

```

conj2Lista s = c2l s 0

```

```

  where

```

```

    c2l 0 _ = []

```

```

    c2l n i | odd n      = i : c2l (n `div` 2) (i+1)
            | otherwise = c2l (n `div` 2) (i+1)

```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ `maxConj` es el máximo número que puede pertenecer al conjunto. Depende de la implementación de Haskell.

```
maxConj :: Int
maxConj =
    truncate (logBase 2 (fromIntegral maxInt)) - 1
    where maxInt = maxBound :: Int
```

- ▶ `vacio` es el conjunto vacío.

```
vacio :: Conj
vacio = 0
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ `maxConj` es el máximo número que puede pertenecer al conjunto. Depende de la implementación de Haskell.

```
maxConj :: Int
maxConj =
    truncate (logBase 2 (fromIntegral maxInt)) - 1
    where maxInt = maxBound::Int
```

- ▶ `vacio` es el conjunto vacío.

```
vacio :: Conj
vacio = 0
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ `maxConj` es el máximo número que puede pertenecer al conjunto. Depende de la implementación de Haskell.

```
maxConj :: Int
maxConj =
    truncate (logBase 2 (fromIntegral maxInt)) - 1
    where maxInt = maxBound :: Int
```

- ▶ `vacio` es el conjunto vacío.

```
vacio :: Conj
vacio = 0
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ `(esVacio c)` se verifica si `c` es el conjunto vacío.

```
esVacio :: Conj -> Bool
esVacio n = n==0
```

- ▶ `(conjCompleto n)` es el conjunto de los números desde 1 hasta `n`.

```
conjCompleto :: Int -> Conj
conjCompleto n
  | (n>=0) && (n<=maxConj) = 2^(n+1)-2
  | otherwise = error ("conjCompleto:" ++ show n)
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ `(esVacio c)` se verifica si `c` es el conjunto vacío.

```
esVacio :: Conj -> Bool
```

```
esVacio n = n==0
```

- ▶ `(conjCompleto n)` es el conjunto de los números desde 1 hasta `n`.

```
conjCompleto :: Int -> Conj
```

```
conjCompleto n
```

```
  | (n>=0) && (n<=maxConj) = 2^(n+1)-2
```

```
  | otherwise = error ("conjCompleto:" ++ show n)
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ `(esVacio c)` se verifica si `c` es el conjunto vacío.

```
esVacio :: Conj -> Bool
```

```
esVacio n = n==0
```

- ▶ `(conjCompleto n)` es el conjunto de los números desde 1 hasta `n`.

```
conjCompleto :: Int -> Conj
```

```
conjCompleto n
```

```
  | (n>=0) && (n<=maxConj) = 2^(n+1)-2
```

```
  | otherwise = error ("conjCompleto:" ++ show n)
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- `(inserta x c)` es el conjunto obtenido añadiendo el elemento `x` al conjunto `c`.

```
inserta :: Int -> Conj -> Conj
inserta i s
  | i >= 0 && i <= maxConj = d' * e + m
  | otherwise              = error ("inserta:" ++ show i)
where (d,m) = divMod s e
      e     = 2^i
      d'    = if odd d then d else d+1
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- `(inserta x c)` es el conjunto obtenido añadiendo el elemento `x` al conjunto `c`.

```

inserta :: Int -> Conj -> Conj
inserta i s
  | i >= 0 && i <= maxConj = d'*e+m
  | otherwise              = error ("inserta:" ++ show i)
where (d,m) = divMod s e
      e     = 2^i
      d'    = if odd d then d else d+1

```

Solución del PV mediante programación dinámica

- `(elimina x c)` es el conjunto obtenido eliminando el elemento `x` del conjunto `c`.

```
elimina :: Int -> Conj -> Conj
elimina i s = d'*e+m
  where (d,m) = divMod s e
        e = 2^i
        d' = if odd d then d-1 else d
```

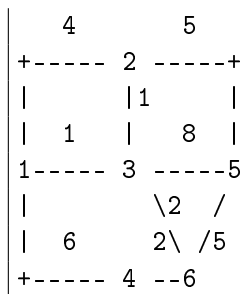
Solución del PV mediante programación dinámica

- `(elimina x c)` es el conjunto obtenido eliminando el elemento `x` del conjunto `c`.

```
elimina :: Int -> Conj -> Conj
elimina i s = d'*e+m
  where (d,m) = divMod s e
        e = 2^i
        d' = if odd d then d-1 else d
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- Ejemplo de grafo para el problema:



Solución del PV mediante programación dinámica

- La definición del grafo anterior es

```

ej1 :: Grafo Int Int
ej1 = creaGrafo True (1,6)
      [(i,j,(v1!!(i-1))!!(j-1))
       | i <- [1..6], j <- [1..6]]

v1::[[Int]]
v1 =[[ 0,  4,  1,  6,100,100],
     [ 4,  0,  1,100,  5,100],
     [ 1,  1,  0,100,  8,  2],
     [ 6,100,100,  0,100,  2],
     [100,  5,  8,100,  0,  5],
     [100,100,  2,  2,  5,  0]]

```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ Los índices de la matriz de cálculo son de la forma (i, S) y sus valores (v, xs) donde xs es el camino mínimo desde i hasta n visitando cada vértice de S exactamente una vez y v es el coste de xs .

```
type IndicePV = (Int, Conj)
```

```
type ValorPV  = (Int, [Int])
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ **(viajante g)** es el par (v, xs) donde xs es el camino de menor coste que pasa exactamente una vez por todos los nodos del grafo g empezando en su último nodo y v es su coste. Por ejemplo,

```
|ghci> viajante ej1  
|(20, [6,4,1,3,2,5,6])
```

```
viajante :: Grafo Int Int -> (Int, [Int])  
viajante g = valor t (n, conjCompleto (n-1))  
  where n = length (nodos g)  
        t = dinamica (calculaPV g n) (cotasPV n)
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ (viajante g) es el par (v, xs) donde xs es el camino de menor coste que pasa exactamente una vez por todos los nodos del grafo g empezando en su último nodo y v es su coste. Por ejemplo,

```
ghci> viajante ej1  
(20, [6,4,1,3,2,5,6])
```

```
viajante :: Grafo Int Int -> (Int, [Int])
```

```
viajante g = valor t (n, conjCompleto (n-1))
```

```
  where n = length (nodos g)
```

```
        t = dinamica (calculaPV g n) (cotasPV n)
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- $(\text{calculaPV } g \ n \ t \ (i,k))$ es el valor del camino mínimo en el grafo g desde i hasta n , calculado usando la tabla t , visitando cada nodo del conjunto k exactamente una vez.

```

calculaPV :: Grafo Int Int -> Int -> Tabla IndicePV ValorPV
          -> IndicePV -> ValorPV
calculaPV g n t (i,k)
  | esVacio k = (peso i n g, [i,n])
  | otherwise = minimum [sumaPrim (valor t (j, elimina j k))
                          (peso i j g)
                          | j <- conj2Lista k]
  where sumaPrim (v,xs) v' = (v+v',i:xs)

```

Solución del PV mediante programación dinámica

- $(\text{calculaPV } g \ n \ t \ (i,k))$ es el valor del camino mínimo en el grafo g desde i hasta n , calculado usando la tabla t , visitando cada nodo del conjunto k exactamente una vez.

```
calculaPV :: Grafo Int Int -> Int -> Tabla IndicePV ValorPV
          -> IndicePV -> ValorPV
```

```
calculaPV g n t (i,k)
  | esVacio k = (peso i n g, [i,n])
  | otherwise = minimum [sumaPrim (valor t (j, elimina j k))
                          (peso i j g)
                          | j <- conj2Lista k]
  where sumaPrim (v,xs) v' = (v+v',i:xs)
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ `(cotasPV n)` son las cotas de la matriz de cálculo del problema del viajante en un grafo con `n` nodos.

```
cotasPV :: Int -> ((Int, Conj), (Int, Conj))  
cotasPV n = ((1, vacio), (n, conjCompleto n))
```

Solución del PV mediante programación dinámica

- ▶ `(cotasPV n)` son las cotas de la matriz de cálculo del problema del viajante en un grafo con `n` nodos.

```
cotasPV :: Int -> ((Int, Conj), (Int, Conj))  
cotasPV n = ((1, vacio), (n, conjCompleto n))
```
