



## PRÁCTICA 3

*Sistema de Colonias de Hormigas*

Autores:

David Díaz Jiménez 77356084T

Andrés Rojas Ortega 77382127F

Grupo 2

# Metaheurísticas

## Informe de prácticas

David Díaz Jiménez, Andrés Rojas Ortega

### Contents

<b>1</b>	<b>Definición y análisis del problema</b>	<b>3</b>
1.1	Representación de la solución . . . . .	3
1.2	Función objetivo . . . . .	3
1.3	Operadores comunes . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Clases auxiliares</b>	<b>3</b>
2.1	Archivo . . . . .	3
2.2	Configurador . . . . .	4
2.3	GestorLog . . . . .	4
2.4	Metaheurísticas . . . . .	4
2.5	Pair . . . . .	4
2.6	RandomP . . . . .	4
2.7	Timer . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Pseudocódigo</b>	<b>5</b>
3.1	algoritmo principal . . . . .	5
3.2	Inicialización de la matriz de feromona . . . . .	6
3.3	Inicialización de la colonia de hormigas . . . . .	7
3.4	Generación de la Lista Restringida de Candidatos . . . . .	7
3.5	Aplicación de la regla de transición . . . . .	9
3.6	Actualización de la feromona local . . . . .	13
3.7	Tareas demonio . . . . .	14
3.8	Obtener la mejor hormiga de la colonia . . . . .	14
3.9	Actualización de la feromona global . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Experimentos y análisis de resultados</b>	<b>16</b>
4.1	Procedimiento de desarrollo de la práctica . . . . .	16
4.1.1	Equipo de pruebas . . . . .	16
4.1.2	Manual de usuario . . . . .	16
4.2	Parámetros de los algoritmos . . . . .	17
4.2.1	Sistema de Colonias de Hormigas . . . . .	17

4.2.2	Semillas . . . . .	17
4.3	Análisis de los resultados . . . . .	17

## 1 Definición y análisis del problema

Dado un conjunto  $N$  de tamaño  $n$ , se pide encontrar un subconjunto  $M$  de tamaño  $m$ , que maximice la función:

$$C(M) = \sum_{s_i, s_j \in M} d_{ij}$$

donde  $d_{ij}$  es la diversidad del elemento  $s_i$  respecto al elemento  $s_j$

### 1.1 Representación de la solución

Para representar la solución se ha optado por el uso de un vector de enteros, en el que el elemento contenido en cada posición se corresponde con un integrante de la solución. La solución vendrá dada por las siguientes restricciones:

- La solución no puede contener elementos repetidos.
- Debe tener exactamente  $m$  elementos.
- El orden de los elementos es irrelevante.

### 1.2 Función objetivo

$$C(M) = \sum_{s_i, s_j \in M} d_{ij}$$

### 1.3 Operadores comunes

El operador de intercambio es el 1-opt, se seleccionara un elemento de la solución actual en base a un criterio y se sustituirá por un elemento que no pertenece a la solución.

## 2 Clases auxiliares

A continuación se enumeran las diferentes clases auxiliares utilizadas en el programa acompañadas de una breve descripción de las mismas.

**nota:** Para obtener información detallada se deben consultar los comentarios insertados en el código de cada una de las clases.

### 2.1 Archivo

Esta clase se encarga de almacenar toda la información que se encuentra dentro de cada archivo que contiene cada uno de los problemas.

## **2.2 Configurador**

Utilizamos esta clase para leer y almacenar los parámetros del programa que se encuentran dentro del archivo de configuración.

## **2.3 GestorLog**

La función principal de esta clase es la administración de los archivos Log del programa y el almacenamiento de información para debug en los mismos.

## **2.4 Metaheurísticas**

Esta clase se utiliza para lanzar la ejecución de los algoritmos para cada problema facilitado como parámetro.

## **2.5 Pair**

Representa un par formado por un candidato y un coste asociado a este.

## **2.6 RandomP**

Clase para generar números aleatorios.

## **2.7 Timer**

Clase para gestionar los tiempos de ejecución del algoritmo.

## 3 Pseudocódigo

### 3.1 algoritmo principal

---

**Algorithm 1** Sistema Colonia Hormigas

---

```
matrizFeromonas  $\leftarrow$  InicializarFeromona()
while iteracionesRealizadas  $\leq$  limiteIteraciones  $\wedge$  tiempoEjecucion  $\leq$  lim-
iteTiempoEjecucion do
    colonia  $\leftarrow$  InicializarColonia()
    for i=1; i<tamañoHormiga; i++ do
        for hormiga  $\in$  colonia do
            lrc  $\leftarrow$  GenerarLRC(hormiga)
            AplicarReglaTransicion(lrc, hormiga)
        end for
        ActualizarFeromonaLocal()
    end for
    TareasDemonio()
     $\emptyset \leftarrow$  colonia
    iteracionesRealizadas  $\leftarrow$  iteracionesRealizadas + 1
end while
```

---

Lo primero que realiza el algoritmo es inicializar la matriz de feromonas con el valor inicial. Esta tarea la realiza la función "InicializarFeromona()", la matriz de feromonas se almacena en la variable "matrizFeromonas". El valor inicial de feromona se pasa como parámetro del programa.

A continuación, entramos en un bucle while cuyas condiciones de parada son: las iteraciones realizadas y el tiempo de ejecución del algoritmo. En el caso de las iteraciones realizadas, almacenadas en la variable "iteracionesRealizadas", deben ser inferiores al límite almacenado en la variable "limiteIteraciones". El valor de "limiteIteraciones" se pasa como parámetro del programa. En el caso del tiempo de ejecución, que se almacena en la variable "tiempoEjecucion", debe de ser inferior al valor almacenado en la variable "limiteTiempoEjecucion". El valor de "limiteTiempoEjecucion" se pasa como parámetro del programa.

Cada vez que empieza una nueva iteración del bucle, lo primero que se realiza es inicializar la colonia de hormigas. La colonia se almacena en la variable "colonia" y la función encargada de inicializarla es "InicializarColonia()".

Una vez inicializada la colonia, iniciamos dos bucles for. El primero se ejecutará hasta que el valor de "i" alcance el número de elementos que debe contener cualquier solución (parámetro del programa, almacenado en la variable "tamañoHormiga"). El segundo bucle for recorrerá cada una de las hormigas pertenecientes a la variable "colonia".

Lo primero que realizamos es almacenar en la variable "lrc" la lista de candidatos restringida de la hormiga, calculada por la función "GenerarLRC(hormiga)".

Una vez almacenada la lista restringida, seleccionamos uno de los candidatos que contiene aplicando la regla de la transición y lo añadimos como parte de la solución de la hormiga. La función que realiza dicha tarea es "AplicarReglaTransicion(lrc,hormiga)".

Se finaliza el bucle for interior y la función "ActualizarFeromonaLocal()" se encarga de actualizar la feromona local de todas las hormigas después de haber añadido un nuevo elemento.

Una vez finalice el bucle for tendremos todas las hormigas completas, por lo que pasamos a seleccionar la mejor hormiga de la colonia y realizar la actualización de la feromona global. La función encargada de dichas tareas es "TareasDemonio()".

Para finalizar el bucle while, vaciamos la variable "colonia" y actualizamos el valor de la variable "iteracionesRealizadas".

### 3.2 Inicialización de la matriz de feromona

**Salida** Devuelve la matriz de feromonas inicializada.

---

**Algorithm 2** InicializarFeromona()

---

```

for i=0; i<tamañoMatriz; i++ do
  for j=0; j<tamañoMatriz; j++ do
     $matrizFeromonas[i][j] \leftarrow feromonaInicial$ 
  end for
end for
return matrizFeromonas

```

---

El funcionamiento de esta función es trivial: se inicializan todos los elementos de la matriz de feromonas con el valor de "feromonaInicial" (parámetro del programa).

### 3.3 Inicialización de la colonia de hormigas

**Salida** Devuelve la colonia de hormigas inicializada.

---

**Algorithm 3** InicializarColonia()

---

```
while colonia.tamaño() < tamañoColonia do  
    hormiga  $\leftarrow \emptyset$   
    primerElemento  $\leftarrow$  GenerarEnteroAleatorio()  
    hormiga  $\leftarrow$  hormiga  $\cup$  {primerElemento}  
    colonia  $\leftarrow$  colonia  $\cup$  {hormiga}  
end while  
return colonia
```

---

El funcionamiento de esta función es trivial: se inicializan todas las hormigas con un elemento generado aleatoriamente con la función "GenerarEnteroAleatorio()". Cuando se tengan "tamañoColonia" (parámetro del programa) hormigas inicializadas, se devuelve la colonia como resultado.

### 3.4 Generación de la Lista Restringida de Candidatos

**Entrada** La hormiga para la que se quiere obtener su Lista Restringida de Candidatos.

**Salida** Devuelve la Lista Restringida de Candidatos "lrc".



---

**Algorithm 4** GenerarLRC(hormiga)

---

```
lrc  $\leftarrow \emptyset$ 
noSeleccionados  $\leftarrow \emptyset$ 
min  $\leftarrow +\infty$ 
max  $\leftarrow -\infty$ 
for i=0;i<tamañoMatriz;i++ do
  if i  $\notin$  hormiga then
    aporte  $\leftarrow 0$ 
    for elemento  $\in$  hormiga do
      aporte  $\leftarrow$  aporte + MatrizCostes[elemento][i]
    end for
    if min ==  $+\infty$  then
      max  $\leftarrow$  aporte
      min  $\leftarrow$  aporte
    end if
    if aporte > max then
      max  $\leftarrow$  aporte
    else if aporte < min then
      min  $\leftarrow$  aporte
    end if
    noSeleccionados  $\leftarrow$  noSeleccionados  $\cup \{i, aporte\}$ 
  end if
end for
valorCorte  $\leftarrow$  min + delta * (max - min)
for elemento  $\in$  noSeleccionados do
  if elemento.aporte  $\geq$  valorCorte then
    lrc  $\leftarrow$  lrc  $\cup \{elemento\}$ 
  end if
end for
return lrc
```

---

Lo primero que se realiza es inicializar los valores de las variables "lrc", "noSeleccionados", "min" y "max". "lrc" almacena la Lista Restringida de Candidatos, "noSeleccionados" almacena todos los elementos del problema que no forman parte de la hormiga, "min" y "max" almacena el mínimo y máximo aporte encontrado hasta el momento.

Se recorren todos los elementos del problema y se comprueba que no se encuentren ya en la hormiga.

En el caso de que no se encuentren en la hormiga, se actualiza el valor de la variable "aporte" a cero y se calcula el coste que aportaría a la hormiga si lo incluyéramos en ella. Este coste se almacena en la variable "aporte".

A continuación, se comprueba que aporte no sea mayor que "max" o menor que "min". En el caso de que se cumpla una de estas dos condiciones, se actualiza el valor de "max" o de "min" dependiendo del caso.

Para finalizar, se añade el elemento junto su aporte a la variable "noSeleccionados".

Se realiza lo anterior hasta que se haya recorrido todos los elementos del problema.

Lo siguiente que se realiza es el cálculo de "valorCorte" aplicando la siguiente fórmula, siendo "delta" un parámetro del programa:

$$valorCorte = min + delta * (max - min)$$

Para cada elemento de "noSeleccionados", se comprueba que su aporte sea mayor que "valorCorte". Si se da este caso, se añade el elemento a la Lista Restringida de Candidatos. Cuando se haya hecho la comprobación de todos los elementos "lrc" habrá sido generada.

Una vez se haya realizado esto último, se devuelve la Lista Restringida de Candidatos generada como resultado de la ejecución de la función.

### 3.5 Aplicacion de la regla de transición

**Entradas** La Lista Restringida de Candidatos "lrc", y la hormiga a la que queremos aplicar la regla de la transición.

---

**Algorithm 5** AplicarReglaTransicion(lrc, hormiga)

---

```
probabilidadesTransicion  $\leftarrow \emptyset$ 
sumatoria  $\leftarrow 0$ 
 $q \leftarrow \text{GenerarFloatAleatorio}()$ 
if  $q \leq q_0$  then
  elemento  $\leftarrow 0$ 
  mayorValor  $\leftarrow -\infty$ 
  for elementoLrc  $\in$  lrc do
    sumatoria  $\leftarrow 0$ 
    for elementoHormiga  $\in$  hormiga do
      sumatoria  $\leftarrow$  sumatoria + (matrizFeromonas[elementoHormiga][elementoLrc]alfa *
      matrizCostes[elementoHormiga][elementoLrc]beta)
    end for
    if mayorValor  $\leq$  sumatoria then
      mayorValor  $\leftarrow$  sumatoria
      elemento  $\leftarrow$  elementoLrc
    end if
  end for
  hormiga  $\leftarrow$  hormiga  $\cup$  {elemento}
else
  for elementoLrc  $\in$  lrc do
    valorSuperior  $\leftarrow 0$ 
    for elementoHormiga  $\in$  hormiga do
      valorSuperior  $\leftarrow$  valorSuperior +
      (matrizFeromonas[elementoHormiga][elementoLrc]alfa *
      matrizCostes[elementoHormiga][elementoLrc]beta)
    end for
    sumatoria  $\leftarrow$  sumatoria + valorSuperior
    probabilidadesTransicion  $\leftarrow$  probabilidadesTransicion  $\cup$ 
    {valorSuperior}
  end for
  indice  $\leftarrow 0$ 
  for valor  $\in$  probabilidadesTransicion do
    probabilidad  $\leftarrow$  (valor/sumatoria)
    probabilidadesTransicion[indice]  $\leftarrow$  probabilidad
    indice  $\leftarrow$  indice + 1
  end for
  uniforme  $\leftarrow \text{GenerarFloatAleatorio}()$ 
  indice  $\leftarrow 0$ 
  probabilidadAcumulada  $\leftarrow 0$ 
  for probabilidad  $\in$  probabilidadesTransicion do
    probabilidadAcumulada  $\leftarrow$  probabilidadAcumulada + probabilidad
    if uniforme  $\leq$  probabilidadAcumulada then
      hormiga  $\leftarrow$  hormiga  $\cup$  {lrc[indice]}
    end if
    indice  $\leftarrow$  indice + 1
  end for
  lrc  $\leftarrow \emptyset$ 
end if
```

---

Esta función selecciona uno de los candidatos de la Lista Restringida de Candidatos y la añade a la hormiga aplicando la siguiente regla:

$$p_k(r, s) = \begin{cases} \text{si } q_0 \leq q & \arg \max_{u \in J_k(r)} \{ (feromona_{ru})^{alfa} * (heuristica_{ru})^{beta} \} \\ \text{en otro caso} & p'_k(r, s) \end{cases} \quad (1)$$

$$p'_k(r, s) = \begin{cases} \text{si } s \in J_k(r) & \frac{(feromona_{rs})^{alfa} * (heuristica_{rs})^{beta}}{\sum_{u \in J_k(r)} (feromona_{ru})^{alfa} * (heuristica_{ru})^{beta}} \\ \text{en otro caso} & 0 \end{cases} \quad (2)$$

Lo primero que se realiza en la función es inicializar las variables "probabilidadesTransicion", "sumatoria" y "q". "probabilidadesTransicion" almacenará la distribución de probabilidades de todos los candidatos y su valor inicial será el conjunto vacío. "sumatoria" almacenará la suma de las dos ecuaciones anteriores y su valor inicial será 0. "q" almacenará un aleatorio generado por la función "GeneraFloatAleatorio".

Después de esto se comprueba si "q0" es menor o igual que "q". Si se da este caso se realiza lo siguiente.

Se inicializa "elemento" a 0 y "mayorValor" a menos infinito. "elemento" se encargará de almacenar el elemento de "lrc" seleccionado. "mayorValor" almacenará el mayo resultado calculado hasta el momento.

Para cada elemento perteneciente a la Lista Restringida de Candidatos se calcula la fórmula de la transición respecto a cada elemento almacenado en la hormiga, y se adiciona cada resultado a la variable "sumatoria".

Una vez obtenido el valor de "sumatoria", se comprueba si mejora "mayorValor". Si se da este caso, se actualiza "mayorValoe" con "sumatoria" y se guarda el elemento de "lrc" en la variable "elemento".

Cuando se haya recorrido toda la Lista Restringida de Candidatos se añade a la hormiga el mejor elemento de "lrc", almacenado en "elemento".

En el caso de que "q" sea menor que "q0" se realiza los pasos que se describen a continuación.

Se inicia un bucle for que recorrerá todos los elementos de la Lista Restringida de Candidatos.

Dentro de este bucle se inicializa la variable "valorSuperior" a 0, esta variable almacenará el numerador de la fórmula.

A continuación se recorren todos los elementos de la hormiga y se realiza el cálculo de la fórmula del numerador y se adiciona a "valorSuperior".

Una vez se hayan hecho todos los cálculos con todos los elementos de la hormiga, se adiciona a "sumatoria" la variable "valorSuperior" y se añade a "probabilidadesTransicion" esta última.

Una vez terminado el bucle for, se inicializa la variable "indice" a 0, que hará las funciones de iterador.

Se inicia un nuevo bucle for que recorrerá todos los valores almacenado en la variable "probabilidadesTransición".

Dentro de este bucle, se calcula la probabilidad de cada elemento de "lrc" con los valores almacenados en "probabilidadesTransicion" y "sumatoria", y se almacenan en "probabilidadesTransicion". Una vez realizado esto, "probabilidadesTransicion" habrá pasado de almacenar los numeradores de la formula de transición de cada elemento de "lrc" a almacenar las probabilidades calculadas para cada elemento de "lrc".

Al terminar de recorrer todos los elementos de "probabilidadesTransicion", se genera aleatoriamente un número decimal entre 0 y 1 y se almacena en la variable "uniforme". Se inicializan las variables "indice" y "probabilidadAcumulada" a 0. "indice" sigue desempeñando la misma función y "probabilidadAcumulada" almacena la sumatoria de todos los valores de "probabilidadesTransicion" que se hayan recorrido hasta el momento.

Para terminar se inicializa un último bucle for en el que se comprobará a qué elemento de la Lista Restringida de Candidatos corresponde el valor de "uniforme" generado haciendo uso de la distribución de probabilidades almacenada en "probabilidadesTransicion". Cuando sepamos el elemento, se añade a la hormiga como parte de la solución y se termina la ejecución de la función.

### 3.6 Actualización de la feromona local

---

**Algorithm 6** ActualizarFeromonaLocal()

---

```

for hormiga  $\in$  colonia do
  elementoB  $\leftarrow$  hormiga.UltimoElmento()
  for i=0;i<=hormiga.tamaño()-1;i++ do
    elementoA  $\leftarrow$  hormiga[i]
    valorAnterior  $\leftarrow$  matrizFeromonas[elementoA][elementoB]
    matrizFeromonas[elementoA][elementoB]  $\leftarrow$  (1 - rho) *
    valorAnterior + rho * (costeGreedy)
    matrizFeromonas[elementoB][elementoA]  $\leftarrow$ 
    matrizFeromonas[elementoA][elementoB]
  end for
end for

```

---

Se recorren todas las hormigas de la colonia y se realizan las operaciones que se describen a continuación.

Se guarda en la variable "elementoB" el último elemento introducido en la hormiga.

A continuación, se inicia un nuevo bucle for que recorre todos los elementos pertenecientes a la hormiga.

Dentro de este bucle, se guarda en la variable "elementoA" el elemento 'i' de la hormiga y el valor de la feromona del arco "elementoA"- "elementoB" en la variable "valorAnterior".

Se actualiza el valor de la feromona del arco "elementoA"- "elementoB", almacenada en "matrizFeromonas" con el resultado de la siguiente función:

$$Feromona(elementoA, elementoB) = (1 - \phi) * valorAnterior + \phi * costeGreedy$$

Una vez se haya actualizado la feromona de todos los arcos nuevos de todas las hormigas, se tendrá "matrizFeromonas" actualizada localmente como resultado de la ejecución de la función.

### 3.7 Tareas demonio

---

**Algorithm 7** TareasDemonio()

---

*mejorHormiga*  $\leftarrow$  *EvaluarMejorHormiga*()  
ActualizarFeromonaGlobal(*mejorHormiga*())

---

El funcionamiento de esta función es trivial: se obtiene la mejor hormiga haciendo uso de la función "EvaluarMejorHormiga()" y se actualiza la feromona global.

### 3.8 Obtener la mejor hormiga de la colonia

**Salida** Se devuelve la mejor hormiga de la colonia.

---

**Algorithm 8** EvaluarMejorHormiga()

---

*mejorHormiga*  $\leftarrow$  0  
*valorMejor*  $\leftarrow$  0  
**for** *hormiga*  $\in$  *colonia* **do**  
    *coste*  $\leftarrow$  *CalcularCoste*(*hormiga*)  
    **if** *coste*  $\geq$  *valorMejor* **then**  
        *mejorHormiga*  $\leftarrow$  *hormiga*  
        *valorMejor*  $\leftarrow$  *coste*  
    **end if**  
**end for**  
**return** *mejorHormiga*

---

Se inicializan las variables "mejorHormiga" y "valorMejor" a 0. "mejorHormiga" almacenará la hormiga con mejor coste de la colonia. "valorMejor" almacenará el coste de la mejor hormiga encontrada.

Se recorren todas las hormigas pertenecientes a la colonia, se calcula el coste de cada hormiga con "CalcularCoste(hormiga)" y, si se mejora "valorMejor", se guarda la hormiga y su coste en las variables destinadas a tal efecto.

Para finalizar, cuando se haya ejecutado el bucle for, se devuelve "mejorHormiga" como resultado de la ejecución.

### 3.9 Actualización de la feromona global

**Entrada** La mejor hormiga de la colonia.

---

**Algorithm 9** ActualizarFeromonaGlobal(mejorHormiga)

---

```
for i=0;i<tamañoMatriz;i++ do
  for j=0;j<tamañoMatriz;j++ do
    valorAnterior ← matrizFeromonas[i][j]
    matrizFeromonas[i][j] ← (1 − phi) * valorAnterior
    matrizFeromonas[j][i] ← matrizFeromonas[i][j]
  end for
end for
coste ← CalcularCoste(mejorHormiga)
for i=0;i<mejorHormiga.Tamaño()-1;i++ do
  for j=i+1;j<mejorHormiga.Tamaño();j++ do
    matrizFeromonas[i][j] ← matrizFeromonas[i][j] + phi * coste
    matrizFeromonas[j][i] ← matrizFeromonas[i][j]
  end for
end for
```

---

En los dos primeros bucles for se recorre toda la matriz de feromonas evaporando el valor que contenía cada celda por el resultante de la siguiente función:

$$EvaporacionFeromona(i, j) = (1 - \rho) * valorAnterior$$

Una vez evaporada toda la matriz de feromonas, se procede a adicionar feromona a todos los arcos pertenecientes a la mejor hormiga de la colonia.

Para este propósito se almacena el coste de la hormiga, haciendo uso de "CalcularCoste(mejorHormiga)", en la variable "coste".

A continuación, haciendo uso de un doble bucle for, recorreremos todos los arcos de la hormiga en la matriz de feromonas y añadimos la feromona resultante de la siguiente función:

$$AdicionFeromona = \rho * coste$$

Cuando se hayan ejecutado los dos bucles for, tendremos la matriz de feromonas actualizada.



## 4 Experimentos y análisis de resultados

### 4.1 Procedimiento de desarrollo de la práctica

Para realizar la práctica, se ha optado por implementar las heurísticas propuestas en el lenguaje de programación JAVA. El ejecutable que se entrega junto a este documento ha sido compilado bajo `APACHE NETBEANSIDE 12.0`.

#### 4.1.1 Equipo de pruebas

Los resultados de las heurísticas han sido obtenidos en el siguiente equipo:

- Host:
- S.O:
- Kernel:
- CPU:
- GPU:
- GPU:
- Memoria RAM :

#### 4.1.2 Manual de usuario

Para ejecutar el software asegúrese de que el archivo `.jar` proporcionado se ubica en el mismo directorio que la carpeta *archivos*.

Cuando se muestre la GUI, podrá seleccionar la heurística que desee mediante el botón correspondiente. Una vez empiece la ejecución de una heurística no será posible seleccionar otra hasta que finalice su ejecución. Los resultados finales se mostrarán en el cuadro de texto, a su vez, se generan los log correspondientes a cada archivo y semilla en la carpeta Log.



Figure 1: GUI

## **4.2 Parámetros de los algoritmos**

### **4.2.1 Sistema de Colonias de Hormigas**

#### **4.2.2 Semillas**

Para la generación de números pseudoaleatorios se utiliza una semilla previamente definida en el archivo de configuración, en este caso es 77356084. Esta semilla se va rotando en las 5 iteraciones de cada archivo.

$$77356084 \rightarrow 73560847 \rightarrow 35608477 \dots$$

## **4.3 Análisis de los resultados**

## References

- [1] Umbarkar, Dr. Anantkumar & Sheth, P.. (2015). CROSSOVER OPERATORS IN GENETIC ALGORITHMS: A REVIEW. ICTACT Journal on Soft Computing ( Volume: 6 , Issue: 1 ). 6. 10.21917/ijsc.2015.0150.
- [2] <https://sci2s.ugr.es/graduateCourses/Metaheuristics>
- [3] <https://sci2s.ugr.es/graduateCourses/Algoritmica>