

UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN APLICANDO EL MODELO DE P-MEDIANA Y RESUELTO A TRAVÉS DEL ALGORITMO COLONIA DE HORMIGAS

Location and optimal sizing problem in distribution systems using the P-median Model and Solved through Ant Colony Algorithm

RESUMEN

El problema de ubicación y dimensionamiento óptimo de transformadores en sistemas de distribución es un tema de importancia en la planeación de los sistemas de distribución. En este trabajo se presenta una metodología para dar solución a este problema, incluyendo, en este, alternativas con transformadores por fuera de la ruta del alimentador principal y costos de red secundaria. Dadas las características que presenta este problema, entre las que se destacan la distribución espacial de los usuarios y localización de los transformadores, se modela usando conceptos de la P-mediana. El modelo matemático es resuelto usando un Algoritmo Colonia de Hormigas. La metodología es validada mediante la evaluación de dos sistemas de prueba de baja y alta complejidad matemática.

PALABRAS CLAVES: Algoritmo Colonia de Hormigas, metaheurísticas, optimización combinatorial, P-mediana, ubicación de transformadores.

ABSTRACT

The location and optimal sizing problem associated to distribution transformers is an important issue in distribution network expansion planning. A methodology for solving the problem mentioned before is presented taking into account alternatives with transformers out of the main feeder's route and secondary network costs. The problem is modeled using a P-median analysis given the spatial distribution of the customers and the location of the transformers. The mathematical model is solved through an Ant Colony Algorithm. The methodology presented was tested in a low and high mathematical complexity distribution test systems.

KEYWORDS: *Ant Colony Algorithm, combinatorial optimization, P-median, metaheuristics, transformers allocation.*

1. INTRODUCCIÓN

El problema del Planeamiento de Sistemas de Distribución es considerado de gran complejidad matemática debido a que es un problema no lineal entero mixto con muchas restricciones y para el cual no existe una técnica eficiente que lo resuelva. Esto ha hecho que los investigadores planteen diversas estrategias para darle solución. Por su complejidad matemática este problema ha sido dividido en dos partes: ubicación de los transformadores de distribución y localización del alimentador primario [1].

En la literatura especializada han sido presentadas diversas metodologías para resolver este problema. En [2] se presenta una metodología que considera la localización de transformadores y tramos de red primaria necesarias para conectar transformadores por fuera de la ruta del alimentador principal. Este es resuelto usando la

técnica de Branch-and-Bound. En [3] se plantea el problema para la ubicación y dimensionamiento de los transformadores, y aquellos que estén por fuera de la ruta del alimentador principal, le asocia el costo de la red primaria. Para su solución implementan un algoritmo genético básico. En [1] se resuelve el problema de ubicación y dimensionamiento de transformadores, considerando incertidumbre en la demanda, para su solución se usó un método híbrido de algoritmos genéticos y lógica difusa. En [4] el problema es dividido en cinco pasos: dimensionamiento, cantidad y localización de los transformadores y dimensionamiento y trazado de las redes basándose en el concepto de centroide. Este es resuelto a través de un método heurístico.

El problema del planeamiento de redes de distribución estudia diferentes aspectos de diseño y de operación dentro de los que se encuentra el enrutamiento y selección de calibres de la red primaria, localización y

CÉSAR ADRIÁN MUÑOZ B.

Ingeniero Electricista.
Profesor Catedrático
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
ceadmuno@utp.edu.co

ELIANA M. TORO O.

Ingeniera Industrial, M.Sc.
Profesor Asociado
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica de Pereira
elianam@utp.edu.co

dimensionamiento de los transformadores de distribución, topología y selección de calibre de la red de baja tensión, entre otros.

En este trabajo se plantea una metodología para solucionar el problema de ubicación y dimensionamiento óptimo de transformadores de distribución como objetivo principal, considerando alternativas de localización de transformadores por fuera de la ruta del alimentador principal. En la metodología planteada se establece además una vinculación entre los usuarios y los transformadores de distribución a través de la red secundaria.

El problema fue planteado usando el modelo de la P-mediana [5] y su solución se llevo a cabo empleando el Algoritmo combinatorial Colonia de Hormigas. Para validar la metodología planteada fueron estudiados dos casos de prueba: el primero con 35 propuestas de localización de transformadores de distribución y 648 usuarios y el segundo con 119 propuestas de localización de transformadores de distribución y 2592 usuarios.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De forma general el problema de localización y dimensionamiento óptimo de transformadores de distribución usando conceptos de la P-mediana consiste en ubicar sobre un plano un conjunto de transformadores para suplir la demanda de los usuarios de una zona en el sistema de distribución en donde su ubicación geográfica es conocida. Las alternativas de localización de los transformadores son presentados como parámetros de entrada. A cada transformador se asocia el costo de la red primaria, si este está por fuera de la ruta establecida para el alimentador principal, el costo de la red secundaria para abastecer los usuarios y el costo mismo del equipo. Como solución del problema se obtiene: localización, cantidad y dimensionamiento de los transformadores de distribución.

A partir de la ubicación de cada transformador se obtiene la cantidad de usuarios que se conectan a él, empleando el modelo de P-mediana. Teniendo en cuenta estos usuarios, se cuantifica la cargabilidad del transformador con lo que se establece su capacidad. A través de la metodología propuesta es posible controlar que la cargabilidad del transformador este dentro de un determinado rango, con lo que se obtiene un dimensionamiento adecuado.

La red secundaria necesaria para alimentar los usuarios asignados es calculada a partir de una función de distancia que cuantifica la longitud entre cada usuario y su respectivo transformador. Esta configuración de red de baja tensión se refiera a la denominada red chilena donde cada usuario está conectado directamente al transformador.

Finalmente, el objetivo consiste en determinar la ubicación y dimensionamiento de los transformadores de manera que se minimice la suma de los costos totales de los equipos empleados, los laterales nuevos del alimentador primario y red secundaria.

3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

La formulación del problema a partir de la aplicación de la P-mediana es la siguiente:

Sea:

$N=\{1, \dots, n\}$ el conjunto de índices para los usuarios.

$J=\{1, \dots, m\}$ el conjunto de índices para las localizaciones potenciales de los transformadores.

$C_T = \sum_{i=1}^P C_{t_i}$ el costo total de los P transformadores empleados.

$C_p = \sum_{i=1}^{nl} C_{p_i} \cdot l_{p_i}$ el costo total de los laterales nuevos del alimentador primario calculado como el costo unitario por la longitud de conductor. nl es el número total de laterales nuevos.

$C_s = \sum_{i=1}^P C_{s_i} \cdot l_{s_i}$ el costo total de la red secundaria calculado como el costo unitario por la longitud de conductor. ns es el número total de líneas usuario-transformador.

Se definen las siguientes variables de decisión:

- T_j . Tomará el valor de 1 si se ubica el transformador en la localización $j \in J$ y de 0 en otro caso.
- X_{ij} . Tomará el valor de 1 si el cliente $i \in N$ se asigna al transformador ubicado en la localización $j \in J$ y de 0 en otro caso.

A partir de estas dos variables se relaciona la ubicación de los transformadores y los usuarios que se le asignen.

El problema puede formularse de la siguiente manera:

$$\min C_T + C_p + C_s \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in J} X_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$X_{ij} \leq T_j, \quad \forall i \in N, j \in J \quad (3)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, T_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

Las restricciones (2) aseguran que cada cliente es asignado a un único transformador.

Las restricciones (3) aseguran que los clientes se asignen a un transformador sólo si éste ha sido seleccionado.

Finalmente, el conjunto de restricciones (4) especifica que todas las variables de decisión son binarias.

4. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

4.1 Codificación

La codificación adoptada es la siguiente:

T1	T2	T3	...	Tj
1	0	0	...	1

Tabla 1. Codificación empleada

Donde T_j representa el transformador, y su valor indica si este se ubica.

4.2 Cálculo de la Función Objetivo

La función objetivo incluye costos asociados a la capacidad y cantidad de transformadores, costos de los laterales nuevos del alimentador primario y costos de red secundaria.

Al igual que en un problema de localización de la P-mediana, la ubicación del transformador se hace de forma que este se encuentre a una distancia equitativa de sus usuarios, es decir, el transformador está ubicado en el punto donde la distancia entre cada uno de los usuarios y este es la menor posible. Esto implica que el transformador se localice en un centro de carga.

Con la ubicación de cada transformador se calcula: la distancia de este al alimentador principal y se multiplica por el costo unitario del conductor, la carga de acuerdo al número de usuarios que estén conectados y a partir de esta la capacidad, la longitud de la red de baja tensión multiplicada por el costo unitario del conductor.

Los costos del transformador dependen de su capacidad (ver Tabla 2). El límite superior admisible respecto a la capacidad es 112.5 KVA. Para una carga mayor se asocia un sobrecosto, de tal manera que esta alternativa de solución resulte ser poco atractiva.

Capacidad	Costo
30 KVA	1251.4 USD
45 KVA	1488.32 USD
75 KVA	2166.68 USD
112.5 KVA	2911.21 USD

Tabla 2. Costos de los transformadores.

Los costos de los laterales nuevos del alimentador primario dependen de la distancia entre el transformador y la ruta del alimentador principal. El costo se calcula como la longitud multiplicada por el valor unitario de la línea. En este estudio se asumió un único calibre de conductor con un costo de 5 USD/m.

Al igual que para el alimentador primario, los costos de la red secundaria dependen de la longitud del conductor necesario para llevar la energía desde cada transformador en particular hasta cada usuario. Para esta metodología se asume que la configuración de la red secundaria es la denominada red chilena, la cual consiste en que cada una de las acometidas de los usuarios parte directamente del transformador. De acuerdo con esto, el costo esta dado por la suma de la longitud de cada acometida multiplicado por el costo unitario del conductor que para este estudio se asume también un único calibre con un valor de 0.8 USD/m

4.3. Algoritmo implementado

La estrategia del Algoritmo Colonia de Hormigas (ACH) [6] para dar solución al problema de localización y dimensionamiento de transformadores de distribución, aplicando conceptos de la P-mediana se basa en proponer alternativas, y a través de un proceso iterativo ir encontrando soluciones de mejor calidad hasta lograr la mejor posible.

4.3.1 Algoritmo Colonia de Hormigas

El ACH es basado en el comportamiento que muestran las hormigas en su entorno natural y en la capacidad que estas poseen para encontrar el alimento a través de la exploración y guiadas por los rastros de feromonas.

En este método, el proceso de búsqueda es guiado por el rastro de feromona. Esta feromona es generada a partir de la información suministrada por el individuo de mejor calidad durante la colonización, simulando un comportamiento de hormigas elitistas.

A partir de la población de hormigas (conjunto de alternativas de solución) se selecciona aquella de mejor calidad (mejor función objetivo) y mediante el proceso iterativo del algoritmo, la feromona va siendo actualizada a partir de la información que suministra dicha hormiga. Para el proceso de depósito de la feromona se emplea una tasa de acumulación la cual indica la cantidad de feromona que deja el mejor individuo en cada iteración. Para evitar el estancamiento del proceso en soluciones de baja calidad, se ejecuta el proceso de evaporación de la feromona de forma global, empleando una tasa de evaporación la cual indica la velocidad con la que se va perdiendo el rastro de feromona. Adicionalmente se emplea otra estrategia de re-inicialización de la feromona para cuando han pasado muchas iteraciones sin

actualización de la incumbente. Este proceso ha mostrado buenos resultados.

Para la obtención de la nueva población de hormigas, se realiza un cálculo aleatorio usando la información de la feromona.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para validar la metodología implementada se estudian dos casos de prueba en los cuales las posibles ubicaciones de los transformadores y los usuarios están espacialmente distribuidos. En las Figuras 1 y 3 se observa la distribución de los usuarios y las alternativas de localización de los transformadores. Los puntos para la localización de los usuarios están distribuidos en manzanas como se puede encontrar comúnmente en una ciudad. Los círculos representan las alternativas de localización de los transformadores que se distribuyen de acuerdo a especificaciones dadas por la norma de la empresa de energía local y a partir de la ruta existente del alimentador principal.

Para cada uno de los casos de prueba se tienen diferentes cantidades de usuarios y alternativas de localización de los transformadores.

El algoritmo fue desarrollado en MatLab R2008a, sobre un ordenador con unas especificaciones de un procesador Pentium 4 de 3,0 GHz y una memoria RAM de 1 GB. Cada caso fue ejecutado 10 veces y fueron usados los mismos parámetros, los cuales son mostrados en la Tabla 3.

Parámetro	Valor
Factor de acumulación	0,01
Tasa de evaporación	0,01
Tamaño de la población	10
Número de iteraciones	25000
Reinicialización de feromona	8300

Tabla 3. Parámetros del ACH.

6.1 Caso de Prueba 1: 648 usuarios y 35 alternativas de localización de transformadores.

Este primer caso de prueba puede considerarse de baja complejidad matemática debido a su tamaño, sin embargo, aunque es un caso teórico no está alejado de la realidad. En este, los puntos corresponden a los usuarios y los círculos a los posibles lugares de emplazamiento de los transformadores.

La solución es obtenida a partir de la ejecución en una sola etapa que incluye la cantidad, dimensionamiento y localización de los transformadores y la longitud de los

laterales nuevos del alimentador primario y la red de baja tensión.

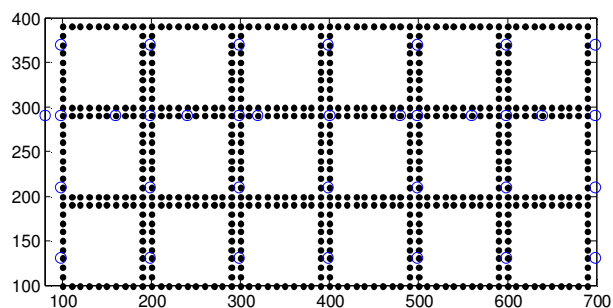


Figura 1. Caso de prueba 1 para 648 usuarios y 35 posibilidades.

La solución obtenida a partir de esta metodología indica la mejor ubicación para un conjunto de transformadores de forma que cubran la totalidad de los usuarios con el menor costo posible.

La solución encontrada es mostrada en la Figura 2. Esta misma solución fue encontrada al realizar varias simulaciones con diferentes poblaciones iniciales generadas aleatoriamente.

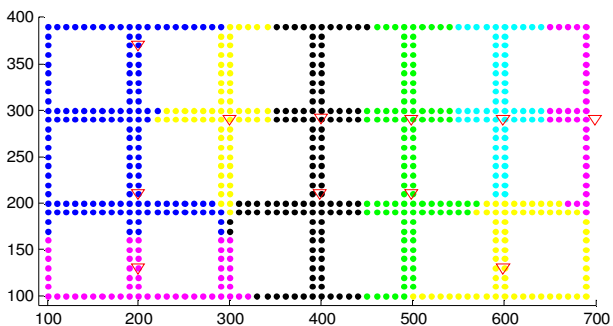


Figura 2. Solución encontrada para el caso de prueba 1.

El tiempo que toma el algoritmo para entregar la solución, es diferente para cada caso. El promedio por caso, fue estimado en **7518.9531 segundos**, que corresponde a aproximadamente **2 horas**.

En la descripción gráfica se puede observar la cantidad final de transformadores, la ubicación geográfica de cada uno y los usuarios que abastece. Cabe resaltar la distribución que siguen los transformadores, observando que algunos están ubicados sobre la trayectoria del alimentador principal y otros están por fuera de esta. Los resultados son mostrados en la Tabla 4.

La longitud de la red secundaria corresponde a la suma de la longitud de conductor entre cada usuario y su transformador asociado de acuerdo con el tipo de red empleada.

En esta metodología se establece una adecuada relación entre el transformador y las redes primaria y secundaria.

A partir de esta, al transformador se asigna la mejor posición teniendo en cuenta la influencia de la red primaria y secundaria y la decisión de la capacidad está influenciada por el número de usuarios y el costo de la red secundaria.

ID Trafo	Carga [kVA]	Capacidad [kVA]	longitud Red Secundaria [m]	longitud Red Primaria [m]
5	93.8	112.5	2675.6	0.0
10	118.0	112.5	4695.9	79.0
18	113.7	112.5	3279.2	1.0
19	92.4	112.5	2553.2	1.0
20	110.7	112.5	3187.1	1.0
21	57.2	75.0	2020.8	1.0
23	120.8	112.5	4042.6	81.0
25	119.3	112.5	4085.9	81.0
26	88.9	112.5	2674.6	81.0
30	100.1	112.5	3539.7	161.0
34	122.4	112.5	3928.3	161.0

Tabla 4. Resultados obtenidos para el caso de prueba 1.

El mejor plan obtenido para la localización y dimensionamiento de transformadores, incluyendo redes primarias por fuera de la troncal principal y redes secundarias es de **49636 USD**.

6.2 Caso de Prueba 2: 2592 usuarios y 119 alternativas de localización de transformadores.

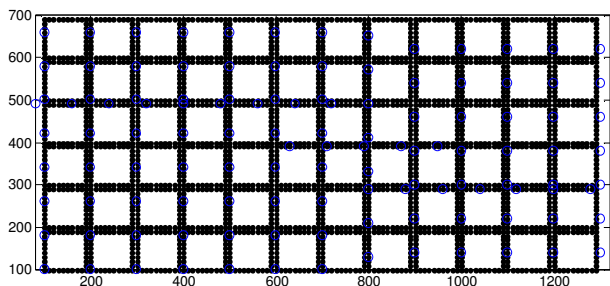


Figura 3. Caso de prueba 2 para 2592 usuarios y 119 posibilidades.

Este segundo caso de prueba, debido a su gran tamaño, puede considerarse de alta complejidad matemática.

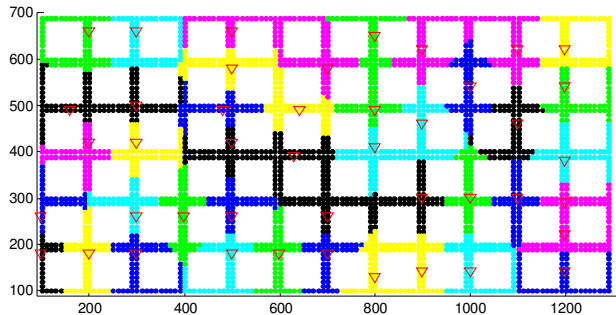


Figura 4. Solución encontrada para el caso de prueba 2. Al igual que para el caso anterior, la misma solución fue obtenida al realizar varias simulaciones con diferentes poblaciones iniciales generadas aleatoriamente.

ID Trafo	Carga [kVA]	Capacidad [kVA]	longitud Red Secundaria [m]	longitud Red Primaria [m]
2	107.5	112.5	3295.5	0.0
6	103.7	112.5	3171.6	0.0
8	122.9	112.5	3348.6	0.0
10	82.7	112.5	1869.1	0.0
11	103.3	112.5	2531.5	0.0
18	80.1	75	2117.5	0.0
25	54.8	75	2051.7	230.0
26	48.3	45	1051.7	310.0
28	117.2	112.5	4434.0	170.0
31	106.6	112.5	3033.4	70.0
34	108.8	112.5	2987.4	310.0
36	123.3	112.5	4233.8	170.0
38	97.1	112.5	2736.7	10.0
39	105.2	112.5	2870.9	70.0
41	92.8	112.5	2573.1	230.0
42	118.3	112.5	3658.4	310.0
49	115.1	112.5	3528.1	230.0
52	97.3	112.5	3531.0	170.0
53	108.6	112.5	3712.7	90.0
55	91.3	112.5	2853.2	70.0
57	90.3	112.5	2483.4	230.0
58	100.8	112.5	3514.9	310.0
66	114.1	112.5	2987.4	310.0
69	115.1	112.5	4089.9	90.0
73	107.8	112.5	4013.8	230.0
74	103.1	112.5	2323.0	310.0
76	85.2	112.5	2379.9	160.0
79	90.6	112.5	2447.7	160.0
80	119.2	112.5	3550.9	330.0
82	121.8	112.5	3602.4	170.0
84	109.2	112.5	2801.9	10.0
86	87.7	112.5	2293.8	150.0
88	114.9	112.5	3570.3	250.0
91	108.1	112.5	2953.6	10.0
93	119.4	112.5	4308.9	150.0
94	113.1	112.5	3433.8	330.0
96	108.7	112.5	3629.5	170.0
98	97.0	112.5	2354.6	10.0
101	117.0	112.5	3988.4	330.0
102	105.2	112.5	3444.4	250.0
104	122.7	112.5	3512.8	90.0
106	92.0	112.5	2869.8	70.0
107	100.6	112.5	3262.1	150.0
115	123.5	112.5	3709.6	170.0

Tabla 5. Resultados obtenidos para el caso de prueba 2.

El promedio por caso, fue estimado en **36061.6406 segundos**, que corresponde a aproximadamente **10 horas**.

De igual forma que para el caso anterior, en esta figura se puede observar la cantidad y la ubicación final de los transformadores y los usuarios.

En los resultados mostrados en la Tabla 5 se puede ver cuáles son las localizaciones que están dentro de la ruta del alimentador y la longitud de los nuevos laterales necesarios para abastecer las necesidades de cada transformador.

Para este caso de prueba el costo total del plan de localización de los transformadores es de **210936 USD**.

7. CONCLUSIONES

Fue resuelto el problema de ubicación y dimensionamiento óptimo de Transformadores en sistemas de distribución, considerando laterales nuevos de red primaria por fuera de la ruta principal y red secundaria tipo chilena, aplicando conceptos de P-mediana y empleando el Algoritmo Colonia de Hormigas en su solución. Los resultados obtenidos permiten establecer una relación entre los transformadores con las redes primarias y secundarias.

Usando conceptos de la P-mediana y técnicas metaheurísticas de optimización fue posible obtener en una sola etapa de planeación la solución conjunta de la cantidad, ubicación y dimensionamiento de los transformadores, la longitud necesaria de los nuevos laterales de la red primaria y la longitud de la red secundaria, de menor costo.

El modelo de P-mediana se adecua de manera eficiente a este tipo de problema donde dadas una necesidades requeridas por los usuarios y los posibles puntos de abastecimiento se puede establecer una adecuada relación entre estos, siendo este el caso entre las demandas de los usuarios y los transformadores de distribución.

Se observo una gran necesidad de trabajar en forma conjunta la red primaria, el transformador y la red secundaria. Por ejemplo si el costo de la red secundaria es bajo la respuesta sería pocos transformadores y pocos tramos nuevos de red primaria, en caso contrario la respuesta sería muchos transformadores de baja capacidad y adicionar nuevos tramos de red primaria.

8. RECOMENDACIONES

Para futuros desarrollos se recomienda incluir dentro del modelo matemático el efecto de las pérdidas en los tramos de la red primaria nuevos, en los transformadores y en la red secundaria.

Incluir diferentes modelos de red secundaria adicionales a la configuración de red chilena que fue considerado en este estudio.

Efectuar diversas comparaciones que midan el desempeño computacional en cuanto a tiempos y calidad de la respuesta, para diferentes técnicas de optimización.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Ramezani, H. Falaghi, M. Parsa Moghaddam, and M.-R. Haghifam, "Genetic Based Algorithm for Optimal Placement of Distribution Transformers", Power Engineering Society General Meeting, 2006, pp. 1-5
- [2] G. Thompson, D. wall, "A Branch-and-Bound Model for Choosing Optimal Transformer Locations", IEEE Trans. PAS 100(1981), pp. 2683-2688
- [3] D. E. Bouchard , M. M. A. Salama, A. Y. Chikhani, "Optimal Distribution Feeder Routing and Optimal Transformer Sizing and Placement Using Evolutionary Strategies" , IEEE, 1994, pp. 661-664.
- [4] Jorge Moreno, Rodrigo Moreno, Sebastian Mocarquer, Hugh Rudnick. "Determinación de un Parque Óptimo de Transformadores para una Empresa Modelo de Distribución", III Congreso Internacional de la Región Andina ANDESCON. 2006.
- [5] César A. Muñoz, Eliana M. Toro, Ramón A. Gallego. "Comparación del desempeño del algoritmo genético de chu-beasley y el algoritmo colonia de hormigas en el problema de p-mediana", Scientia et Technica. No 47, pp. 213 - 218. 2011.
- [6] Ramón A. Gallego, Antonio Escobar, Eliana M. Toro. "Técnicas Metaheurísticas de Optimización". Texto Universitario Universidad Tecnológica de Pereira. Segunda Edición. 2008.