

# SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN (CFLP) A TRAVÉS DE BÚSQUEDA TABÚ Y RELAJACIÓN LAGRANGEANA, CASO DE ESTUDIO: INDUSTRIA DE PRODUCTOS ALIMENTARIOS<sup>1</sup>

M. Villa Marulanda<sup>2</sup>, G. Leguizamón<sup>3</sup>, K. Niño<sup>4</sup>, Departamento de Ingeniería Industrial  
Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia.

Recibido Julio 23, 2010 – Aceptado Septiembre 21, 2010

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v4n2.a07>

**Resumen**— En este trabajo se aborda el problema de localización de plantas de producción con restricción de capacidad. Los datos de demanda, número de clientes, número de plantas y capacidad de éstas son conocidos. El problema es solucionado mediante la aplicación de Relajación Lagrangeana y Búsqueda Tabú los cuales brindan buenas soluciones para este tipo de problemas. La programación realizada se prueba con instancias encontradas en la literatura que permiten encontrar resultados factibles con tiempos computacionales aceptables.

**Palabras clave**— Localización, Búsqueda Tabú, Relajación Lagrangeana, capacidad, Industria de Productos Alimentarios.

**Abstract**— This paper addresses the localization problem with capacity constraint. Demand data, number of customers, number and capacity of these plants are known. The problem is solved by applying Lagrangean Relaxation and Tabu Search which provide good solutions for these problems. The test program was conducted instances encountered in the literature for finding workable results with acceptable computational times.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los problemas de localización de centros de distribución o plantas de producción (FLP) en un área específica, han sido de gran importancia en las investigaciones que se han abordado en los últimos años, cuyo objetivo es soportar la toma de decisiones para la expansión de grandes empresas de manufactura y de servicios. En la academia estos problemas se han abordado desde diferentes puntos de vista con el

objetivo de encontrar métodos que brinden cada vez nuevas y mejores soluciones con tiempos computacionales eficientes.

El problema de localización de planta (FLP) se convierte en un problema de localización con restricción de capacidad (CFLP) cuando es adicionada una nueva restricción de capacidad finita (limitada) para cada una de las plantas a localizar con el fin de satisfacer la demanda de los clientes ubicados en determinada área. Tal como se muestra en los antecedentes (sección 3), diversas investigaciones han dado solución al CFLP a través de la aplicación de métodos exactos, heurísticas, metaheurísticas que permitan encontrar resultados óptimos o muy cercanos a éste. Así, este trabajo aborda el problema mediante la combinación de Relajación Lagrangeana (LR, por sus siglas en inglés) y Búsqueda Tabú (TS, por sus siglas en inglés) para encontrar cotas inferiores y superiores, respectivamente, permitiendo así hallar buenas soluciones que estén lo más cercanas posibles al valor óptimo de cada una de las instancias evaluadas.

La descripción del problema, su formulación y contextualización con el caso de estudio son presentados en la sección 2. En la sección 3 se describen los antecedentes del problema, es decir, los trabajos e investigaciones realizadas hasta el momento del CFLP bajo el enfoque de diversos métodos, incluidos Relajación Lagrangeana y Búsqueda Tabú. Finalmente, el modelo propuesto es discutido en la sección 4, en la sección 5 se encuentran los resultados obtenidos y las conclusiones presentadas en la sección 6.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 2.1 Problema de localización de planta con capacidad (CFLP)

El problema de localización con restricción de capacidad puede ser clasificado en diferentes categorías dependiendo de las restricciones que se consideren en cada una de ellas. Cuando las plantas tienen capacidad ilimitada para satisfacer

<sup>1</sup> Se omite nombre de la empresa por razones de confidencialidad

<sup>2</sup> M. Villa Marulanda, Marcela Villa Marulanda, Ingeniera Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, E-mail: marcela.villa@upb.edu.co

<sup>3</sup> G. Leguizamón, Ingeniera Física de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, E-mail: gi.leguizamón40@uniandes.edu.co

<sup>4</sup> K. Niño, Ingeniera Industrial de la Universidad Central, E-mail: ky.niño20@uniandes.edu.co

la demanda de los clientes donde cada uno de los clientes es atendido por una sola planta, el problema se denomina Uncapacitated Facility Location Problem (UFLP). Cuando se añade una nueva restricción de capacidad limitada para las plantas, el problema es denominado Capacitated Facility Problem (CFLP). Los problemas pueden seguirse extendiendo dependiendo de las restricciones consideradas, por ejemplo, el de una sola planta conocido como Single Source Capacitated Facility Location Problem (SSCFLP). [1].

## 2.2 Contexto del caso de estudio de la industria de productos alimentarios

La empresa produce y comercializa productos alimentarios de panadería y repostería. Actualmente, esta empresa cuenta con 4 plantas ubicadas en Tenjo, Yumbo, Soledad e Itagüí para abastecer los mercados de Cundinamarca, Valle, Atlántico y Antioquia, respectivamente. Estas plantas le distribuyen a 10 Agencias de Distribución quienes a su vez distribuyen a los minoristas, en las diferentes ciudades del país tal como se observa en la Tabla I.

El problema busca ubicar una o más plantas de producción en la zona que se resalta en la figura 1 que corresponde al oriente y sur oriente del país, de tal forma que se pueda cubrir la mayor demanda posible al menor costo.

TABLA I

PLANTAS Y AGENCIAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA INDUSTRIA DE PRODUCTOS ALIMENTARIOS.

<i>Plantas de producción</i>	<i>Agencias de distribución</i>	
Tenjo, Cundinamarca (1996)	Agencias Locales	Bogotá, Tenjo
Yumbo, Valle (2000)	Agencias Foráneas	Bucaramanga, Medellín, Itagüí,
Soledad, Atlántico (2005)		Cali, Pereira
Itagüí, Antioquia (2006)	Agencias Costa	Barranquilla, Cartagena, Soledad

Fuente: (Bonilla Rojas, 2009)



Fig.1. Zona de ubicación de plantas candidatas

Fuente: Elaboración propia

## 2.3 Formulación del Problema

El problema de localización con restricción de capacidad se formula basado en la modelación matemática propuesta por Chen & Ting [1]. En el modelo propuesto de este trabajo se omite la restricción que impide la apertura de más de una planta según lo formulado en [1], con lo cual el modelo puede determinar el número de plantas necesarias para satisfacer la demanda total toda vez que se minimizan los costos totales.

Considerando  $n$  como el número de clientes dentro del área especificada en la figura 1;  $m$  el número de locaciones candidatas para la ubicación de las plantas;  $C_{ij}$ , con  $i=1, 2, \dots, n$  y  $j=1, 2, \dots, m$ , el costo de atender la demanda del cliente  $i$  desde la ubicación de la planta  $j$ ;  $d_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , la demanda del cliente  $i$ ;  $S_j$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ , la capacidad de la planta  $j$ ;  $f_j$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ , el costo fijo de la planta  $j$ . Las capacidades de cada una de las plantas, así como los costos fijos de éstas y la demanda de cada cliente son conocidas. El objetivo es localizar el número de plantas necesarias para atender a los clientes al mínimo costo posible. Siendo  $X_{ij}$  y  $Y_j$  las variables del problema definidas así:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si el cliente } i \text{ es atendido por la planta } j \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

$$Y_j = \begin{cases} 1 & \text{Si la planta es localizada en la ubicación candidata } j \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

La formulación del CFLP es como sigue:

- *Función Objetivo*

$$\min Z = \sum_i^n \sum_j^m C_{ij} X_{ij} + \sum_j^m f_j Y_j \quad (1)$$

- *Restricciones*

$$\sum_j^m X_{ij} = 1, \forall i \quad (2)$$

$$\sum_i^n d_i X_{ij} \leq S_j Y_j, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j^m S_j Y_j \geq \sum_{i=1}^n d_i \quad (4)$$

$$X_{ij} \leq Y_j \quad \forall j \quad \forall i \quad (5)$$

$$Y_j = \{0,1\} \quad (6)$$

$$X_{ij} = \{0,1\} \quad (7)$$

La ecuación (1) es la función a minimizar y corresponde a los costos totales de abastecimiento, es decir, los costos de atender la demanda cuando se abre una planta candidata, más los costos totales fijos de localizar dicha planta. El grupo de restricciones (2) hacen que cada cliente sea abastecido por una sola planta; el grupo de restricciones (3) garantizan que la planta abierta tenga la suficiente capacidad para atender la demanda asignada; las restricciones (4) aseguran que el total de las plantas abiertas cubran la demanda total de la zona; el grupo de restricciones (5) indican que si se abre cualquier planta candidata  $j$ , ésta puede o no atender el cliente  $i$ , en caso de no abrirse, no sería posible atender el cliente  $i$ . El grupo de restricciones (6) y (7) hacen que las variables de decisión sean binarias.

### 3 ANTECEDENTES

#### 3.1 Problema de Localización

El problema de localización de plantas para satisfacer la demanda de los clientes usando efectivamente los recursos ha sido ampliamente estudiado en las investigaciones realizadas por [2], [3], [4], [5], [6], [7], entre otros. El objetivo es proveer el mejor acceso posible a los clientes con los recursos disponibles teniendo como criterios la distancia, el tiempo o el costo de viaje.

##### *Problema de localización general*

Uno de los métodos que ha sido ampliamente usado para este tipo de situaciones es el problema de *p-Median (PMP)* [2] que consiste en encontrar dónde ubicar  $p$  instalaciones (plantas) logísticas en una red para abastecer la demanda de los clientes considerando como función objetivo la minimización del tiempo o la distancia. Este

modelo ha sido aplicado en extensos casos de problemas reales [3], aunque tiene una complejidad de  $N^p C^p$  puede ser resuelto en un tiempo computacional competente [4].

Klose y Drexler [5] Realizan una revisión de los modelos propuestos en la literatura en cuanto al diseño de sistemas de distribución y localización de planta. Ellos muestran supuestos fundamentales y modelos matemáticos que arrojan buenos resultados en tiempos computacionales eficientes. Uno de los modelos revisados por Klose & Drexler [5] es el *p-median*, el cual es abordado por Klose & Görtz [6] mediante la propuesta de dos modelos donde el objetivo es minimizar la suma de las distancias ponderadas rectilíneas a través del modelo *1-median*. Ellos presentan un algoritmo  $O(n \log n)$  que permite encontrar un valor óptimo para el problema de localización de planta.

##### *Problema de localización con restricción de capacidad*

Por una lado, Klose & Görtz [6] abordan el CFLP a través del planteamiento de un algoritmo Branch and Price para lograr encontrar soluciones factibles en tiempos computacionales eficientes. La función objetivo que se minimiza son los costos de operación y transporte en la medida en que se satisface la demanda de cada cliente, a partir de la selección de una posible localización contemplada dentro del conjunto de ubicaciones candidatas determinadas.

Por otro lado, Melkote & Daskin [7] abordan el CFLP como un caso de una red, trabajándolo como un problema de programación entera mixta. Ellos dan solución al problema empleando Branch and Bound bajo un análisis de sensibilidad que consiste en validar y agregar desigualdades (restricciones) al modelo. Los resultados encontrados muestran que la extensión realizada del modelo arroja soluciones cercanas al óptimo del 5% con tiempos computacionales menores a los 5 minutos.

#### 3.2 Búsqueda Tabú

Búsqueda tabú es un método metaheurístico el cual hace uso de una memoria flexible (o adaptativa) así como de estrategias especiales para la solución de problemas de optimización combinatoria en donde el proceso de solución hace una búsqueda de todas las soluciones factibles y se detiene cuando ha encontrado la mejor de éstas, actualizando la mejor solución. Si la mejor solución obtenida es producto de un movimiento tabú, se actualiza la mejor solución y este movimiento deja de ser tabú. Esta mejor solución se conoce como *criterio de aspiración* [8], [9]. Este método generalmente es usado para solucionar problemas de asignación de máquinas para la programación de la producción, sin embargo, un sinnúmero de investigaciones han abordado los problemas de localización y distribución de plantas (o facilidades) a través del enfoque de Búsqueda Tabú (Tabu Search – TS). Respecto al problema de localización de planta bajo el enfoque de Búsqueda Tabú, Sun [10] trabaja este problema como un UFLP. El autor plantea un conjunto de

posibles soluciones donde la movida entre una y otra corresponde a la apertura o cierre de plantas. El autor prueba el método TS con varias instancias de la literatura y se encuentra que, en cuanto a calidad de las soluciones y tiempo computaciones, TS obtiene mejores resultados comparados con los resultados arrojados por otros métodos heurísticos y metaheurísticos trabajados en esa investigación. Asimismo, Filho & Galvao [11] hacen uso del método metaheurístico TS para solucionar el CLP (Concentrator Location Problem) el cual es muy similar al CFLP. Los autores utilizan Relajación Lagrangeana (LR) para encontrar cotas inferiores que se utilizan como soluciones iniciales para la metaheurística Búsqueda Tabú (TS) a fin de generar soluciones cercanas al óptimo. Las instancias para el problema son generadas de manera aleatoria y algunas tomadas de la literatura. Los resultados muestran que TS obtiene soluciones competitivas, en cuanto a tiempo computacional, en comparación con otros métodos de solución propuestos para este problema. En una investigación más reciente que la realizada por Filho & Galvao [11], Arostegui et al [12] realiza una comparación empírica entre los métodos metaheurísticos Simulated Annealing (SA), Genetic Algorithm (GA) y Tabu Search (TS) para resolver el problema de localización general (Facility Location Problem – FLP). Este problema se aborda a través de la derivación de tres problemas cuya finalidad es hacer una mejor comparación entre las metaheurísticas. Dentro de estos problemas derivados está el problema objeto de estudio: CFLP. Después de las pruebas empíricas, los autores concluyen, paralelo a lo encontrado por Sun [10], que el rendimiento de TS muestra el mejor rendimiento para el CFLP en un tiempo computacional menor, comparado con GA y SA.

### 3.3 Relajación Lagrangeana

El CFLP ha sido abordado por Filho & Galvao [11] y Chen & Ting [1] entre otros, bajo el enfoque de Relajación Lagrangeana (LR). Por un lado, parte de la investigación realizada por Filho & Galvao [11] muestra la utilización de LR con TS para encontrar cotas inferiores y cotas superiores, respectivamente, como solución al CFLP. Ellos concluyen que estas aplicaciones son apropiadas para este problema cuando se introducen nuevas restricciones o el tamaño de las instancias resulta imposible trabajarlo mediante métodos exactos. Por otro lado, Chen & Ting [1] realizan una combinación de LR con el método metaheurístico Ant Colony (AC) para la localización de una sola planta. Los resultados muestran competitividad de estos al compararlos con los encontrados a través de otros algoritmos propuestos.

## 4 METODOLOGÍA PROPUESTA

El modelo que se propone en este trabajo es la combinación de Relajación Lagrangeana (LR) y

Búsqueda Tabú (TS) (figura 2). Estos métodos permiten encontrar cotas inferiores y superiores, respectivamente, las cuales son comparadas con los valores óptimos de cada una de las instancias probadas.

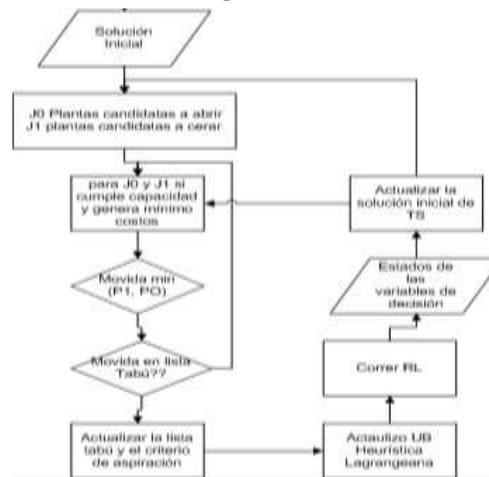


Fig. 2. Diagrama de flujo del método propuesto

### 4.1 Tabu Search (TS)

#### Movida

Dentro del modelo propuesto, una movida está definida como el cambio de status de una planta. El status puede adoptar únicamente dos formas: apertura o cierre de una planta. Una movida (o cambio de status) de una planta puede realizarse si y solo si se cumple la restricción de capacidad (restricción (3)) y si la movida no se encuentra prohibida por la lista tabú (tabu list). En este modelo se considera una única movida al mismo tiempo, dos movidas no son permitidas en la misma iteración.

#### Tamaño Lista Tabú

El tamaño de la lista Tabú se define de forma aleatoria, ya que este método no deteriora las soluciones encontradas en las iteraciones realizadas según como Arostegui et al [12] y Taillard [13] afirman en sus investigaciones. De esta manera, se determina un tamaño de lista tabú igual a 6 acorde con lo sugerido por los autores.

#### Criterio de parada

Se propone como criterio de parada para el método metaheurístico Búsqueda Tabú un número límite de iteraciones realizadas. Esto se debe a que el criterio de parada que tiene en cuenta el tiempo computacional de la búsqueda podría resultar, en este caso, demorada ya que el lenguaje de programación utilizado es Visual Basic.

### 4.2 Relajación Lagrangeana (LR)

#### Formulación

Al aplicar Relajación Lagrangeana para el cálculo de cotas inferiores del problema, se tiene la siguiente

formulación (8) en donde se relaja el grupo de restricciones (2) y pasa a formar parte de la función objetivo. El grupo de restricciones (3), (4), (5), (6) y (7) no se alteran en la formulación relajada.

$$\min Z = \sum_i^n \sum_j^m C_{ij} X_{ij} + \sum_j^m f_j y_j + \sum_i^n \mu_i (1 - \sum_j^m x_{ij}) \quad (8)$$

### 4.3 Instancias evaluadas

Las instancias que se evaluarán son las encontradas en OR-Library disponibles para problemas de “*Capacitated warehouse location*”, que son similares al CFLP propuesto en este estudio. Se evaluarán 13 instancias con diferentes números de clientes y ubicaciones de plantas para localizar. Los tamaños específicos de cada una de las instancias pueden verse en la Tabla II.

TABLA II.

INSTANCIAS PARA PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN CFLP

Instancias	Tamaño ( $n,m$ )	Capacidad planta $j$ ( $S_j$ )	Costo Fijo planta $j$ ( $f_j$ )
CAP41	50x16	5000	7500
CAP51	50x16	10000	17500
CAP61	50x16	15000	7500
CAP71	50x16	58268	7500
CAP81	50x25	5000	7500
CAP91	50x25	15000	7500
CAP101	50x25	58268	7500
CAP111	50x50	5000	7500
CAP121	50x50	15000	7500
CAP131	50x50	58268	7500

## 5 RESULTADOS COMPUTACIONALES

Inicialmente, se aplicó el algoritmo Búsqueda Tabú tomando como solución inicial los resultados del algoritmo *Drop*, con el fin de obtener el “status” de las variables de decisión propuestas en el modelo como son el estado de las plantas y la asignación de clientes a dichas plantas con el mínimo costo total. Una vez se obtiene una solución generada por Tabú Search. El costo asociado a esta solución se toma como cota superior para luego resolver el problema por Relajación Lagrangeana. Nuevamente, cuando se obtiene la solución de la relajación, el status de las variables  $X_{ij}$  y  $Y_j$  se introducen, manualmente, como solución inicial para Tabú Search. Finalmente, se corre Tabú Search otra vez y ésta es la solución reportada en la tabla III para cada una de las instancias.

Los resultados obtenidos permiten tener una asignación eficiente de clientes a plantas cerca de la solución óptima en tiempos computacionales muy cortos, sin necesidad de usar un software especializados de optimización. El algoritmo Tabú Search y el Algoritmo de Drop fueron implementados en VBA dentro de la plataforma de Excel Office 2007®; la Heurística de Relajación Lagrangeana se desarrolló en el lenguaje GAMS. Las instancias se corrieron en un computador Intel de 4GB de memoria RAM, obteniendo resultados en un corto tiempo computacional.

En la tabla III se muestran los resultados obtenidos para las instancias propuestas para el problema de localización CFLP.

TABLA III.

RESULTADOS COMBINACIÓN BÚSQUEDA TABÚ Y RELAJACIÓN LAGRANGEANA PARA EL CFLP

Instancias	Tamaño ( $n,m$ )	Costo Solución Factible	Costo Solución Óptima	BRECHA (%)
CAP41	50x16	1340569,75	1040444,38	22,4
CAP51	50x16	1396606,25	1025208,23	26,6
CAP61	50x16	1599426,88	932615,75	41,7
CAP71	50x16	944797,93	932615,75	1,3
CAP81	50x25	1395676,9	838499,288	39,9
CAP91	50x25	1300687,23	796648,438	38,8
CAP101	50x25	806618,9	796648,437	1,2
CAP111	50x50	1348999,52	826124,713	38,8
CAP121	50x50	1395424,38	793439,563	43,1
CAP131	50x50	952177,46	793439,562	16,7

Los resultados obtenidos muestran soluciones cercanas al óptimo, para el caso de la instancia CAP71 se tiene una brecha del 1,3% por encima de la solución óptima. Estas soluciones son factibles y resuelven el problema de asignación. Estos resultados computacionales se encontraron con los mismos parámetros de lista tabú definidos anteriormente, el tamaño de lista tabú fue igual a 6 y el criterio de movida fue el mismo en todas las instancias.

Se puede observar que las soluciones que presentan la menor brecha CAP71, CAP101, CAP131 son las soluciones a las instancias que tienen mayor capacidad, las instancias con la misma capacidad tienen los resultados similares. De esto podemos concluir que la restricción de capacidad hace el problema más difícil para encontrar una solución cerca al óptimo.

### CONCLUSIONES

La implementación de la metaheurística Búsqueda Tabú y la Heurística Lagrangeana en un problema de localización con capacidad fue objeto de estudio en este trabajo.

La implementación de la heurística Lagrangeana como estrategia para solución del problema de localización (CFLP) es un buen enfoque en la medida en que es permitido combinarla con otros métodos heurísticos para encontrar soluciones factibles cercanas al óptimo en muy poco tiempo computacional.

Los resultados arrojados por la combinación de Tabu Search y la Heurística Lagrangeana muestran que para las instancias con mayor capacidad se obtienen mejores resultados. Esto indica que las soluciones estarán más cercanas al óptimo si el problema no tuviese restricciones de capacidad.

La utilización del TS y LR como solución del problema tiene una penalización de máximo el 43% sobre los costos óptimos para las instancias de la literatura. Podrían ensayarse la combinación de otros algoritmos para comparar los resultados y determinar la conveniencia de éstos en la solución de problemas de localización con restricciones de capacidad. Encontrar soluciones óptimas o acercarse al valor óptimo se dificulta en la medida en que se restrinjan las variables de decisión a valores binarios, tal como se consideró en este estudio.

### AGRADECIMIENTOS

Al profesor asociado de la Universidad de los Andes, José Fidel Torres, por su valiosa asesoría.

### BIOGRAFÍA



Marcela Villa Marulanda, Ingeniera Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga y profesora auxiliar de la misma institución. Candidata a Magíster en Ciencias área Industrial de la Universidad de los Andes.



Gabriela Inés Leguizamón, Ingeniera Física de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales y candidata a Magíster en Ciencias área Industrial de la Universidad de los Andes.



Karen Yineth Niño Mora, Ingeniera Industrial de la Universidad Central y candidata Magíster en Ciencias área Industrial de la Universidad de los Andes.

### REFERENCIAS

- [1] Chen, C.H., Ting, C.J., 2008, Combining Lagrangian heuristic and Ant Colony System to solve the Single Source Capacitated Facility Location Problem, *Transportation Research*, 44, 1099-1122.
- [2] Murray, A., Guerrard, R., Capacitated service and regional constraints in location-allocation modeling, *Location science*, 5, 103-118. 1997.
- [3] Jackson, L., Rouskas, G., Stallmann, M. The directional p-median problem: definition, complexity, and algorithms, *European journal of operational research*, 179, 1097-1108. 2007
- [4] Owen, S., Daskin, M., Strategic facility location: A review, *European journal of operational research*, 111, 423-447, 1998.
- [5] Klose, A., Drexl, A., Facility location models for distribution system design, *European Journal of Operational Research*, 162, 4-29. 2005.
- [6] Klose, A., Görtz, S., A branch-and-price algorithm for the capacitated facility location problem, *European Journal of Operational Research*, 179, 1109-1125. 2007
- [7] Melkote, S. & Daskin, M. S. Capacitated facility location/network design problems. *European Journal of Operational Research*, 129, 481-495. 2001
- [8] Glover, F., Tabu Search, Part I, *ORSA Journal on Computing*, 2, 4-32. 1989
- [9] Glover, F., Tabu Search, Part II, *ORSA Journal on Computing*, 2, 4-32. 1990.
- [10] Sun, M., Solving the uncapacitated facility location problem using tabu search, *Computers & Operational Research*, 33, 2563-2589. 2006.
- [11] Filho, V.J.M.F., Galvao, R.D., A tabu search heuristics for the concentrator location problem, *Location Science*, 6, 189-209. 1998.
- [12] Arostegui, M.A., Kadipasaoglu, S.N., Khumawala, B.M., An empirical comparison of Tabu Search, Simulated Annealing and Genetic Algorithm for facilities location problems, *Int. J. Production Economics*, 103, 742-754, 2006.

- [13] Taillard, E., Robust taboo search for the quadratic assignment problem, *Parallel computing*, 17, 443–455., 1991.