

Utilización de Metaheurísticas para el Dimensionamiento y Localización de Instalaciones Industriales.

Miguel Ángel Ortega Mier¹, Joaquín Delgado Hipólito²

¹ Profesor Ayudante de Escuela Universitaria (Ingeniero Industrial, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III, Avenida de la Universidad 30, Leganés, 28911 Madrid. maortega@ing.uc3m.es.)

² Profesor Titular de Universidad (Doctor Ingeniero Industrial, ETSI Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid. hipolito@ingor.upm.es)

RESUMEN

El clásico problema CFLP (Capacitated Facility Location Problem) no puede ser considerado como un enfoque para la integración de decisiones de localización y dimensionamiento de instalaciones industriales, ya que en el CFLP las distintas capacidades de las instalaciones a localizar están predeterminadas. Cuando se utiliza un enfoque para combinar las decisiones de localización y dimensionamiento de instalaciones industriales, la complejidad del problema aumenta considerablemente respecto al problema CFLP, con lo que se puede considerar que el uso de técnicas metaheurísticas como el recocido simulado es una alternativa adecuada para la resolución este tipo de problemas.

1. Introducción.

Históricamente, en la ingeniería de organización se han venido abordando diferentes tipos de problemas que afectan al diseño, la planificación, la programación y el control de sistemas productivos. Para la resolución de tales problemas se han utilizado métodos cuantitativos que han sido desarrollados a propósito para determinados tipos de problemas o que tienen un carácter general que permite su uso para una amplia variedad de problemas.

La explotación de las técnicas cuantitativas para la resolución de problemas de organización industrial ha estado muy condicionada por el avance tecnológico en la informática. Muchos de los métodos cuantitativos se caracterizan por incluir un gran número de operaciones sencillas de forma repetitiva, lo que facilita su aplicación mediante ordenador. Así, los avances en la capacidad de almacenamiento de datos y, especialmente, en la velocidad de proceso de los ordenadores, permiten utilizar de forma ágil determinadas técnicas para determinados problemas, que hace unos años eran inabordables.

En este trabajo se aborda un problema complejo, combinación de localización y dimensionamiento de instalaciones ya que se trata de determinar, entre un conjunto de instalaciones con una ubicación y con una gama de posibles capacidades conocidas, aquéllas que darían servicio a un conjunto de clientes y cuál sería la dimensión elegida para cada una de ellas, todo ello incurriendo en el menor coste global posible.

Para ayudar en la caracterización del problema, en la sección 2 se presentan los problemas de localización y dimensionamiento de instalaciones industriales. La sección 3 se ocupa de la introducción del recocido simulado como técnica de búsqueda para resolver el problema y se centra en el enfoque que se ha adoptado para utilizar esta técnica en el problema de localización y dimensionamiento de instalaciones. En la sección 4 se resumen las experiencias

realizadas sobre dos tipos de problemas de base real y, finalmente, en la sección 5 se presentan las principales conclusiones obtenidas del trabajo.

2. Dimensionamiento y localización de instalaciones.

En la ingeniería de organización, el dimensionamiento y la localización de instalaciones industriales siempre han sido considerados como dos aspectos clave del diseño de sistemas productivos. Si bien siempre se ha destacado la interrelación existente entre ambos, estos problemas se han abordado por separado, sobre todo desde el punto de vista de la modelización y el uso de métodos cuantitativos para su resolución [1, 2].

En la revisión de la literatura realizada se han detectado carencias en las técnicas de dimensionamiento de instalaciones en lo referente a la consideración con carácter cuantitativo de la localización de las instalaciones. Sin embargo, en algunos métodos cuantitativos para la localización de instalaciones industriales se tiene en cuenta la capacidad o dimensión de las instalaciones objeto del problema.

2.1 Enfoques para la localización de instalaciones industriales.

Puede encontrarse en la literatura una gran variedad de tipologías de problemas de localización de instalaciones, de modelos y de técnicas para su resolución, atendiendo al número de instalaciones a localizar y a los criterios con los que evaluar diferentes soluciones.

Para el caso de los problemas de localización de múltiples instalaciones se han planteado tres grandes familias: problemas n -median (se minimizan las distancias o ponderadas entre clientes y plantas), p -median (se minimiza la suma de las distancias o costes totales) y diferentes tipos de problemas de cobertura [2].

Entre todos los modelos para la localización de un número no determinado de instalaciones considerando una capacidad determinada para cada una de las posibles plantas, se ha tomado como referencia el problema conocido como CFLP (*Capacitated Facility Location Problem*) [3].

Para la resolución de este problema se han venido presentando técnicas alternativas en los últimos 40 años y todavía continúa ocupando a los investigadores de métodos cuantitativos [3, 4].

2.2 El problema de localización de instalaciones con capacidad determinada (CFLP (*Capacitated Facility Location Problem*)).

El problema CFLP consiste en seleccionar, de un conjunto de N instalaciones preseleccionadas, cada una de ellas con una capacidad y una prelocalización determinadas, aquellas que van servir a un conjunto de M clientes, cada uno de ellos con una ubicación y unas necesidades (demanda) conocidas. Se trata de minimizar el coste total derivado de poner en marcha las instalaciones seleccionadas y de servir la demanda.

La formulación de este programa en términos de programación lineal es:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^N f_j y_j \\
 & \sum_{j=1}^N x_{ij} = d_i \quad \forall i = 1, \dots, M \\
 & x_{ij} \leq y_j \cdot ca_j \quad \forall i = 1, \dots, M \quad \forall j = 1, \dots, N \\
 & \sum_{i=1}^M x_{ij} \leq ca_j \quad \forall j = 1, \dots, N \\
 & x_{ij} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, M \quad \forall j = 1, \dots, N \\
 & y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, N
 \end{aligned} \tag{1}$$

Siendo: y_j : variable binaria de decisión (0: no se utiliza la instalación j ; 1: se utiliza la instalación j)

x_{ij} : demanda del cliente i que es suministrada por la planta j

Donde:

d_i : cantidad demandada por el cliente i en un intervalo de tiempo

ca_j : capacidad de la planta j en ese intervalo de tiempo

f_j : coste fijo al que se incurre al abrir la instalación j

c_{ij} : coste operativo (variable) servir una unidad de producto al cliente i desde la planta j . Suele ser la suma del coste unitario de transporte más el coste variable unitario de producción.

Como en otros tipos de problemas para los que se pretenda utilizar la programación lineal, el aumento del número de posibles instalaciones y de clientes a satisfacer complica notablemente la resolución del problema mediante esta técnica. Debido a esto, distintos investigadores han propuesto enfoques alternativos, optando en muchos casos por la utilización de métodos heurísticos [5, 6, 7]

En este trabajo se aborda un problema más complejo, que sin embargo sirve para una mayor aproximación a situaciones reales, como es el caso en el cual las N instalaciones preseleccionadas, con sus correspondientes ubicaciones, no tienen una capacidad determinada *a priori*, sino que se puede elegir la dimensión (k) de cada una de las posibles plantas (j) entre un número discreto de posibilidades ($k=1, \dots, K_j$).

Por tomar como referencia el problema CFLP ampliamente difundido en la literatura especializada, el problema propuesto se ha denominado MCFLP (*Multiple Capacitated Facility Location Problem*) o de localización de instalaciones con múltiples posibilidades de capacidad.

Con las ecuaciones (2) se ha planteado este problema en términos de programación lineal.

$$\begin{aligned}
 \min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_k^{K_j} ct_{ij} x_{ijk} + \sum_{j=1}^N \sum_k^{K_j} f_{jk} y_{jk} + \sum_i^M \sum_j^N \sum_k^{K_j} cv_{jk} x_{ijk} \\
 \sum_k^{K_j} y_{jk} \leq 1 \quad \forall j = 1, \dots, N \\
 \sum_{j=1}^N x_{ij} = d_i \quad \forall i = 1, \dots, M \\
 x_{ijk} \leq y_{jk} \cdot ca_{jk} \quad \forall i = 1, \dots, M \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall k = 1, \dots, K_j \\
 \sum_{i=1}^M x_{ijk} \leq ca_{jk} \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall k = 1, \dots, K_j \\
 x_{ijk} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, M \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall k = 1, \dots, K_j \\
 y_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall k = 1, \dots, K_j
 \end{aligned} \tag{2}$$

Siendo: y_{jk} : variable binaria de decisión (0: no se utiliza la instalación j con la dimensión k ; 1: se utiliza con esa dimensión)

x_{ijk} : demanda del cliente i que es suministrada por la planta j utilizándose ésta con la dimensión k

Donde:

d_i : cantidad demandada por el cliente i

ca_{jk} : capacidad de la planta j cuando se tiene la dimensión k

f_{jk} : coste fijo al que se incurre al abrir la instalación j con la dimensión k

ct_{ij} : coste variable de transporte que se incurre al llevar una unidad de producto desde el cliente i a la planta j .

cv_{jk} : coste variable de producción de la planta j cuando está instalada la capacidad k

Un problema MCFLP tiene un tamaño mucho mayor que el correspondiente CFLP. Baste considerar que el número de variables se multiplica por la suma de las posibles dimensiones de las instalaciones a considerar ($K_1 + K_2 + \dots + K_N$). Por ejemplo, un problema CFLP con 19 clientes a servir desde 5 posibles plantas daría lugar a 100 variables, que serían 1500 si cada una de las 5 instalaciones preseleccionadas pudiera tener hasta 3 dimensiones diferentes en el caso MCFLP.

Por lo tanto, en un problema MCFLP no es necesario un gran número de clientes o de posibles instalaciones para que su resolución mediante un algoritmo exacto o que garantice la obtención de la solución óptima sea inabordable. Como se ha mencionado para el caso de un problema CFLP de gran dimensión, un tipo de alternativas para la resolución de problemas MCFLP pasa por el uso de métodos de búsqueda local o técnicas metaheurísticas que requieren el uso intensivo del ordenador, como el recocido simulado que se ha utilizado en este trabajo.

3. El recocido simulado.

Se ha elegido el recocido simulado como técnica para resolver primero el problema CFLP, que servirá para validar el enfoque y el programa informático desarrollado, para abordar a continuación la resolución del problema MCFLP.

3.1 El algoritmo.

El recocido simulado es un procedimiento de búsqueda local para obtener soluciones aproximadas a un problema de optimización que fue enunciado por primera vez por Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi en 1983 [8]. Se establece un paralelismo entre el proceso de las moléculas de una sustancia que van colocándose en los diferentes niveles energéticos buscando el equilibrio y las soluciones visitadas por un procedimiento de búsqueda local. Un movimiento que permite visitar una solución es siempre posible si la *energía* (función objetivo a minimizar) disminuye, o bien, en caso contrario, se aceptará con una probabilidad proporcional al factor de Boltzmann:

$$\text{Exp}(-\Delta G / T) \quad (3)$$

donde ΔG representa el incremento de la función objetivo al pasar de una solución a otra.

Así, la estrategia consiste en comenzar con una temperatura inicial alta. Esto proporciona una probabilidad también alta de aceptar un movimiento de no mejora. En cada iteración se va reduciendo la temperatura y por lo tanto las probabilidades son cada vez más pequeñas conforme avanza el procedimiento.

En cada experimento de recocido simulado (figura 1) hay que definir una serie de parámetros característicos:

T_0, T_f (temperaturas inicial y final),

$T=T(r)$ (ley de enfriamiento),

L (número máximo de soluciones que se pueden “visitar” con la misma temperatura),

minpercent (porcentaje mínimo de movimientos aceptados exigible a una temperatura sin mejora de la solución),

maxcont (número máximo de estados consecutivos a distintas temperaturas en los que no se ha encontrado ninguna solución mejor ni el porcentaje mínimo de movimientos aceptados),

LB (valor de la función objetivo que se considera aceptable).

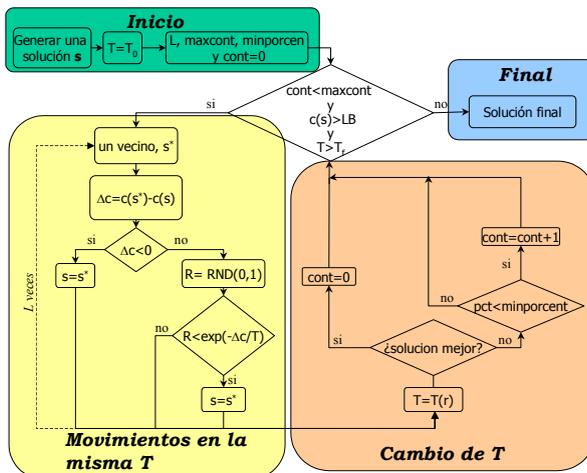


Figura 1: Fases del recocido simulado.

A la vista de la figura 1, la aplicación de un algoritmo de recocido simulado se puede detener por dos razones básicas: se alcanza la temperatura final o se detecta que se han explorado demasiadas soluciones sin una mejora significativa.

3.2 Modelización de problemas de localización y dimensionamiento de instalaciones mediante recocido simulado.

En este apartado se va explicar cómo se han modelado los problemas CFLP y MCFLP, para poder resolverse mediante el recocido simulado. El programa informático para la captura de datos, resolución del problema y análisis del proceso y de los resultados ha sido realizado en VisualBasic.

3.2.1 Representación de soluciones

En los dos tipos de problemas se utiliza una notación matricial para determinar cualquier solución y poder identificarla.

En el problema CFLP la matriz solución está compuesta por tantas filas como clientes existen más uno ($m+1$), ya que se utiliza una fila auxiliar (fila de holguras), y tantas columnas como instalaciones posibles (n). Los valores de los elementos de la submatriz superior de dimensión $m \times n$ serán los valores de las distintas x_{ij} . Las variables y_j toman el valor 0 ó 1, en función de la holgura de la planta j (si la holgura es menor que la capacidad, la planta se abre, $y_j=1$).

En la misma línea, en el problema MCFLP la matriz solución estará compuesta por tantas filas como clientes existen más dos ($m+2$) y tantas columnas como instalaciones posibles (n). A las m filas primeras, se añade, como en el caso anterior, la fila de holguras (donde ahora se indica la holgura que le queda a una planta cuando tiene una dimensión determinada), y una fila de capacidades que indica, entre todas las posibles, la dimensión que tiene una planta en la solución actual (figura 2).

Conviene hacer notar que en la resolución mediante el recocido simulado se ha eliminado el subíndice k de las variables x_{ijk} . En la formulación (2) este subíndice se hace necesario para que respetar la linealidad del modelo.

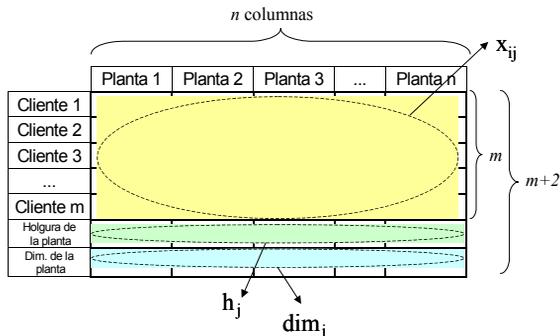


Figura 2: Matriz representativa de una solución del problema MCFLP.

3.2.2 Soluciones vecinas

La similitud con la estructura de un problema de transporte proporciona una idea de cómo pasar de una solución a otra utilizando el recocido simulado [9]. Si en el primero se utilizan “circuitos” o “pasarelas” para pasar de una solución factible a otra a partir de una regla de introducción, para el recocido simulado estos circuitos se eligen al azar. El valor del coste de la nueva solución y la temperatura actual orientarán la aceptación de la nueva solución.

Este enfoque se utiliza en los dos tipos de problemas abordados (CFLP y MCFLP). Para determinar una nueva solución se necesita elegir y evaluar uno de los múltiples circuitos a partir de la solución actual y, si se acepta el movimiento, caracterizar esta solución vecina.

Para la construcción de una nueva solución es importante destacar hay dos tipos de movimiento muy distintos:

- uno, sencillo, que no supone más que una redistribución de flujos y que sólo provocará cambios en los costes variables en el CFLP y en los costes de transporte en el MCFLP.
- otro, que también lleva a abrir o cerrar instalaciones en los problemas CFLP y MCFLP y, en los problemas MCFLP, a cambiar la dimensión de las instalaciones.

3.2.3 Leyes de enfriamiento

Para la resolución de los problemas se han usado dos leyes de enfriamiento: una ley de enfriamiento geométrica y otra aritmética.

4. Resolución de problemas de localización y dimensionamiento de instalaciones mediante recocido simulado.

4.1 Problema CFLP

Se ha elegido un caso real para mostrar la resolución del problema CFLP mediante el recocido simulado. El caso que se ha escogido es parte del Proyecto “Valorización energética de residuos de fragmentación y neumáticos provenientes de vehículos fuera de uso” financiado por la iniciativa ATYCA del Ministerio de Industria y Energía en 1999.

En una zona geográfica española existen 4 instalaciones (clientes) que producen determinadas cantidades de residuo, que puede llevarse a cualquiera de las 7 plantas de tratamiento próximas.

Se trata de un problema lineal con 35 variables y 42 restricciones, de las cuales 7 son binarias (y_j) y el resto continuas (x_{ij}). La solución óptima de este problema, calculada mediante una aplicación informática sencilla de programación lineal, se ha obtenido en 33 pasos.

Se han hecho varios experimentos de recocido simulado sobre este problema. En muchas ocasiones se ha llegado a la solución óptima, aún a costa de investigar un mayor número de soluciones (desde 255 hasta incluso 4450 soluciones).

En cualquier caso, se ha comprobado la influencia de la elección de los parámetros característicos en un experimento de recocido. Como ejemplos, se ha observado que el uso de una ley de enfriamiento geométrica está prácticamente dominado por el de una ley de enfriamiento aritmética; por otra parte, excepto si se investiga un número muy pequeño de

soluciones, los resultados han estado en todos los casos por encima del 90% del valor de la función objetivo en el óptimo.

4.2 Problema MCFLP

Para este problema se ha tomado como referencia el ejemplo anterior de 4 clientes y 7 posibles plantas, de las cuales solamente 3 tienen la capacidad predeterminada, dos de ellas pueden tener dos dimensiones diferentes y en el caso de las dos restantes puede optarse entre tres valores para su capacidad.

De esta forma, el problema CFLP de 35 variables con 42 restricciones se ha transformado en un problema MCFLP que tendría 455 variables con 466 restricciones si se pretendiera resolver mediante programación lineal.

A la vista de la experiencia con el problema CFLP, del cual se conocía el óptimo, la utilización del recocido simulado para un caso general no abordable mediante programación lineal, es importante regular el funcionamiento del algoritmo de manera que no se detenga por alcanzar la temperatura mínima rápidamente. Con los medios disponibles, se considera preferible realizar un número "excesivo" de iteraciones, con el correspondiente consumo de CPU de ordenador, antes que detener precipitadamente el proceso.

La figura 3 muestra los resultados obtenidos con una ley de enfriamiento "lento" geométrica, donde, en la zona de la derecha, puede apreciarse que, si no se ha llegado al óptimo, no va a ser posible encontrar una solución mejor por muchos intentos de explorar nuevas soluciones que se realizaran. Por otra parte, en la zona remarcada a la izquierda se destaca el riesgo que supone detener precipitadamente el recocido simulado (por una economía de recursos informáticos y de tiempo, posiblemente): en unas pocas iteraciones más se hubiera alcanzado una solución claramente mejor y muy próxima a la obtenida finalmente sin restringir mucho el funcionamiento del algoritmo.

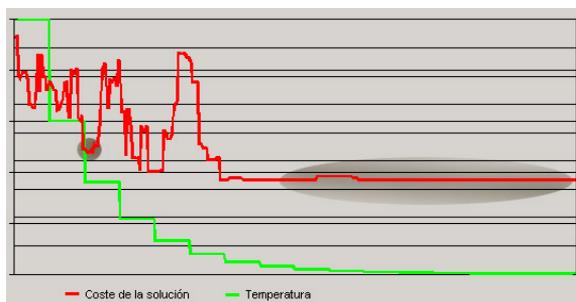


Figura 3: Función objetivo y temperatura en un experimento del problema MCFLP

5. Conclusiones.

La principal conclusión del trabajo realizado se ha alcanzado al lograr el principal objetivo planteado: es posible la resolución mediante el recocido simulado de un problema complejo como el de la determinación de la localización y la dimensión de las instalaciones que darán servicio a un conjunto de clientes determinado. Los resultados obtenidos para problemas de pequeña dimensión, para los que pudo determinarse previamente la solución óptima, indican un alto grado de eficiencia de la técnica empleada.

En problemas de una mayor dimensión, el uso de cualquier técnica heurística impide conocer con certeza absoluta si se ha alcanzado la solución óptima o el grado de aproximación a ésta que se ha logrado. Sin embargo, los experimentos realizados muestran que un uso correcto del recocido simulado conduce a soluciones satisfactorias. A tales efectos, en el desarrollo y utilización de una aplicación informática de recocido simulado se sugiere:

- Una ley de enfriamiento lento. La velocidad de cálculo se ha mostrado más que suficiente para investigar un gran número de soluciones en poco tiempo, aún para problemas de gran dimensión. Se ha comprobado que unas condiciones no adecuadas de funcionamiento del algoritmo (por ejemplo, una ley de enfriamiento rápida) detienen el proceso proporcionando una solución que hubiera sido mejorada notablemente de haber proseguido la búsqueda. Es preferible excederse en el número de soluciones investigadas ya que en caso contrario es difícil percibir orientaciones acerca de la calidad de la solución final obtenida.
- Mecanismos gráficos de rastreo de las soluciones. Aunque ralentice el proceso de cálculo, ya que se debe registrar información de las soluciones exploradas, la evolución de las soluciones obtenidas (véase como ejemplo la figura 3) aporta información adicional acerca de solución final obtenida, simplemente por la observación de la estabilidad de las últimas exploraciones (en términos de la función objetivo). El registro de soluciones exploradas, convenientemente estructurado, puede facilitar la identificación de soluciones alternativas a la finalmente retenida y con similares resultados. En la selección de tales soluciones pueden intervenir criterios no considerados en la función objetivo.

Referencias

- [1] Francis, R.L., McGinnis, L.F., White, J.A., (1992) "Facility layout and location: an analytical approach", Prentice-Hall.
- [2] Mirchandani, P.B., (1990) "Discrete Location Theory", John-Wisley & Sons, Inc.
- [3] Kuehn, A.A., M. J. Hamburger (1963) "A heuristic program for locating warehouses", Management Science, 9, pp. 643-666.
- [4] Klose, A., Drexl, A., (2000) "Lower Bounds for the Capacitated Facility Location Problem Based on Column Generation", Universität St. Gallen, pp. 1-3.
- [5] Shetty, B., (1990), "Approximate solutions to large scale capacitated facility location problems", Applied Mathematics and Computation, 39, pp.159-175.
- [6] Rolland, E., Schilling, D. A., Current, J. R., (1996) "An efficient tabu search procedure for the p-median problem", European Journal of Operational Research, 96, pp. 329-342.
- [7] Shmoys, D.B., Tardos, E. , Aardal, K., (1997) "Approximation algorithms for facility location problems", Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, pp. 265-274.
- [8] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., (1983) "Optimization by simulated annealing", Science, vol. 220, pp. 671-680.
- [9] Taha, H.A., (1971) "Investigación de operaciones", Representación y servicios de ingeniería, S.A., pp. 118-141.