

ENFOQUE MULTI OBJETIVO DEL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE PROCESOS INDUSTRIALES. ESTADO DEL ARTE.

J.M. Montalvá

Universitat Politècnica de València. Dpto. Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil, Camino de vera s/n, Valencia, España.

A. Hospitaler, H.Saura

Universitat Politècnica de València. Instituto de ciencia y tecnología del hormigón, Camino de vera s/n, Valencia, España.

D. Hernández-Figueirido

Universitat Jaume I. Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Avda. Sos Baynat s/n, Castellón, España.

Abstract

The facility layout problem of industrial processes is a fundamental aspect in the study of implementation of any company. The most widely used method is the SLP, and in the synthesis phase there are many methods of generating layouts used by the planner to generate alternatives which shall include the final solution. The material handling cost has been historically used to optimize. The main objective of this paper is to review the multi-objective approaches to the problem made to serve as a basis to researchers interested in this field.

Keywords: *facility layout problem; multiobjective optimization; Pareto*

Resumen

El problema de distribución en planta de procesos industriales es uno de los aspectos fundamentales en el estudio de implantación de cualquier empresa. La metodología de uso más extendido es el SLP, y en la fase de síntesis existen multitud de métodos de generación de layouts empleados por el proyectista para generar alternativas de entre las cuales estará la que finalmente se implante. El coste ha sido, históricamente, el objetivo empleado para optimizar las alternativas generadas, pero tal y como estableció Muther no es el único, lo que confiere al problema un enfoque claramente multiobjetivo. El objetivo fundamental de esta comunicación es realizar una revisión de las aproximaciones multiobjetivo realizadas al problema, que sirva como base a investigadores interesados en este campo.

Palabras clave: *optimización multiobjetivo; distribución en planta; Pareto*

1. Introducción

El problema de distribución en planta de procesos industriales es un problema ampliamente tratado en el ámbito de la ingeniería industrial. Muther (1968) estableció una metodología organizada y sistemática (SLP) para resolver el mismo, que se ha empleado como referencia por los profesionales del sector. En ella hace mención expresa al carácter multicriterio del problema en dos fases claramente diferenciadas: Por una parte en la confección de la tabla relacional de actividades, que es fruto del estudio de las relaciones entre actividades, como consecuencia de múltiples factores, y se constituye como punto de partida en la síntesis de alternativas (en ella queda patente el marcado carácter multiobjetivo del problema). Por otra parte, la evaluación y selección de alternativas, se debe realizar mediante alguna metodología multicriterio.

Sin embargo, algunos autores también han intentado considerar esta singularidad en otras fases del SLP, como pueden ser en las de evaluación y síntesis de soluciones, considerando más de un objetivo en el proceso de generación de soluciones óptimas en la fase del block layout.

Desde la formulación inicial del problema de localización de plantas industriales establecido por Koopmans y Beckman (1957) hasta el año 1979 fueron muchos los intentos por resolver el problema de la distribución en planta. Cada publicación establecía nuevas estrategias en los procedimientos de construcción y/o mejora y diferentes formas de evaluar la calidad de cada una de las soluciones obtenidas, pero siempre desde un enfoque monobjetivo, que trataba, en la mayor parte de los casos, de minimizar el coste derivado del movimiento de los materiales (en adelante MHC).

En este año Rosenblatt (1979) plantea una primera propuesta para combinar dos criterios a la hora de obtener la distribución más eficiente, siendo el primer intento de abordar el problema con una formulación claramente multiobjetivo (anteriormente Muther, en la resolución del problema mediante teoría de grafos ya había introducido parcialmente algunos aspectos multiobjetivo). En el estado del arte previo a la metodología propuesta, el autor resume las dos grandes corrientes de trabajo existente en ese momento, diferenciadas por la naturaleza de la función objetivo empleada:

- **Criterios cuantitativos:** donde quedan enmarcadas técnicas como: Craft (Armour y Buffa,1963), (Gilmore,1962), (Lawler,1963), (Hillier,1963), (Hillier y Connors,1966), Frat (Khalil,1973)... en las que la resolución del problema se centra en minimizar los costes relacionales derivados de un único criterio, el MHC. Son por tanto técnicas cuantitativas monobjetivo. Uno de los mayores inconvenientes que presenta este planteamiento es asumir que el coste relacional del sistema es directamente proporcional a la distancia recorrida por los productos, por tanto se priman los principios de circulación y mínima distancia sobre los de seguridad y confort, integración de conjunto, flexibilidad y espacio cúbico.
- **Criterios cualitativos:** donde destacan procedimientos como Aldep (Seehof y Evans,1967) y Corelap (Lee y Moore,1967), basados en la minimización de los costes relacionales derivados de criterios cualitativos (establecidos mediante intensidades de la Tabla Relacional de Actividades). Son técnicas cualitativas monobjetivo. Estos métodos presentan un gran inconveniente: la imprecisión y la tendencia hacia la subjetividad en la forma de valorar las relaciones entre actividades. Proponen, como punto de partida, la construcción de la Tabla Relacional de Actividades establecida por Muther (1968) para evaluar la necesidad de proximidad entre pares de actividades bajo diferentes puntos de vista. Por tanto, la tabla así construida, obedece a un planteamiento multicriterio del problema.

Rosenblatt insiste en su publicación en la necesidad de estudiar el problema atendiendo a más de un criterio, en concreto uno cuantitativo y otro cualitativo, estableciendo una serie de soluciones que sean eficientes, no óptimas. El problema de distribución en planta es un problema de optimización que ha sido objeto de numerosas publicaciones en revistas internacionales, hasta el año 2006 cerca de 2000 (Sangwan y Kodali,2006). Tras más de treinta años desde la publicación de Rosenblatt, se han encontrado cerca de una cuarentena de referencias que se aproximan al problema desde una óptica multiobjetivo, incluyendo un par de estados del arte que buscan clasificarlas.

El objetivo de esta comunicación es revisar las publicaciones existentes, aportando una nueva clasificación que recoja a las nuevas vías de aproximación al problema, incluyendo aquellas que emplean técnicas de optimización basadas en el concepto de conjunto de Pareto. En el segundo apartado, se resumen las clasificaciones establecidas en las referencias bibliográficas de resumen, completándolas con todas las referencias aparecidas desde la publicación de las mismas y en el tercero se propone una nueva clasificación para las publicaciones del problema de distribución en planta desde una óptica multiobjetivo, que pueda servir de herramienta a investigadores.

2. Primeras clasificaciones del problema de distribución en planta multiobjetivo

Tal y como se ha comentado en la introducción, se pueden encontrar en la bibliografía existente dos estados del arte de las aproximaciones que han realizado los diferentes autores al problema de distribución en planta desde una perspectiva multiobjetivo:

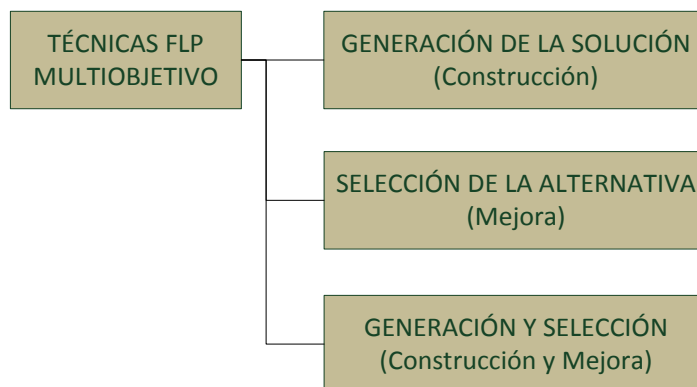
- En el trabajo de **Waghodekar y Sahu (1986)**, se puede encontrar una revisión excesivamente temprana, pues se produce en un momento en el que únicamente se habían producido 8 publicaciones en este campo, que aun estaba poco explorado. Los autores aportan una primera clasificación de las publicaciones hasta ese momento en la que incluye técnicas como el MUCFAL de Sayin (1981) y las técnicas MFLAP que propondrán los autores posteriormente en (Waghodekar y Sahu,1986) y una segunda la MFLAPSA que no se llegaría a publicar. Asimismo se realiza una descripción de los objetivos que se pueden emplear en la formulación del problema.
- La publicación de **Matai y Singh (2008)** repasa una parte de las publicaciones realizadas en el campo, haciendo especial hincapié a la línea de trabajo de Chen y Sha (2005), que es la misma que emplearán los autores en una publicación posterior. Cita los artículos más importantes en el campo, pero deja de lado muchas de las aportaciones realizadas en los últimos años.

Es por tanto necesario realizar un estado del arte minucioso y más actual en este campo para poder situar las metodologías propuestas en el mismo de una manera precisa y marcar posibles líneas de investigación. El número de publicaciones en revistas internacionales en los 30 años de vigencia del problema ha sido constante y en los últimos años se ha visto incrementado, después de una época en la que no aparecieron apenas nuevas líneas de investigación en el campo. Las clasificaciones propuestas hasta la actualidad en este campo son las de Waghodekar y Malakooti, que se comentan a continuación.

2.1 Clasificación de Waghodekar y Sahu

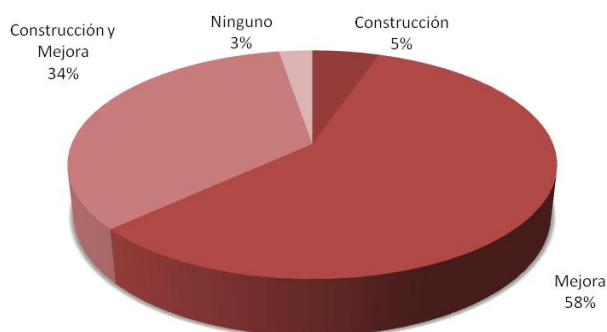
En el trabajo de Waghodekar y Sahu (1986) se puede encontrar una primera clasificación de las técnicas multiobjetivo aplicadas al problema de distribución en planta, según el momento del proceso de optimización en el que se tiene en cuenta el carácter multicriterio del problema.

Figura 1: Clasificación de técnicas propuesta por Waghodekar.



De todas las referencias del problema encontradas en la bibliografía, la distribución de las mismas según esta clasificación es la que se muestra en la Figura 2, destacando el hecho de que la gran mayoría de referencias se pueden enmarcar dentro de técnicas de mejora.

Figura 2: Distribución de artículos según clasificación de Waghodekar.



- **Generación de la solución (Construcción):** En este primer grupo de técnicas, la distribución en planta es el resultado de una serie de decisiones tomadas bajo diferentes criterios. Realmente se trata de un método para la agregación de opiniones de varios expertos, al calificar los grados de relación entre actividades, y tomando estas opiniones en la fase de generación de la solución.

Los autores incluyen en este grupo técnicas de su propia creación como MFLAP (Waghodekar y Sahu,1986), siendo el artículo de Meller y Gau (1996), la única referencia adicional que se pueda incluir en esta categoría.

- **Selección de la alternativa (Mejora):** El procedimiento de selección de alternativas se lleva a cabo mediante alguna metodología de análisis multicriterio que, a su vez, puede desarrollarse de dos formas distintas:

Bien, mediante el empleo, en la formulación del problema, de una función objetivo resultante de la agregación de los criterios que se desea contemplar. La forma más habitual de hacerlo es a través de modelos aditivos (suma ponderada) y en algunas referencias con modelos multiplicativos. Se pueden incluir en este grupo las siguientes aproximaciones: (Rosenblatt,1979), (Dutta y Sahu,1982), (Fortenberry y Cox,1985), (Urban,1987), (Urban,1989), (Malakooti,1989), (Suresh y Sahu,1993), (Shang,1993), (Islir,1998), (Chen y Sha,1999), (Sha y Chen,2001), (Wang, Hu y Ku,2005), (Tuzkaya, Ertay y Ruan,2005), (Aiello, Enea y Galante,2006), (Logendran y Kriausakul,2006), (Ye y Zhou,2007) y (Sahin y Türkbey,2009).

O bien utilizando procedimientos de jerarquización. En este caso se realiza la generación de multitud de soluciones (habitualmente aleatorias) a un determinado problema, que posteriormente son seleccionadas mediante un procedimiento de jerarquización: ELECTRE, AHP, DEA... En este grupo quedan enmarcadas las aportaciones de: (Cambron y Evans,1991), (Lin y Sharp,1999), (Yang y Kuo,2003) y (Yang y Hung,2007).

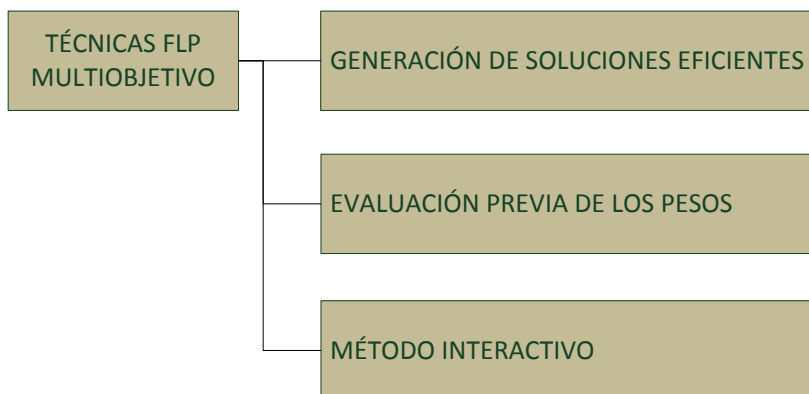
- **Generación y selección de alternativas. (Construcción y mejora):** Malakooti y D'Souza (1987) proponen el primer método de agregación parcial interactivo. Es un procedimiento en el que se van generando y evaluando alternativas secuencialmente. La evaluación la realiza uno o varios expertos bajo diferentes criterios. Las opiniones expresadas son tenidas en cuenta a la hora de generar la siguiente alternativa, guiando así el procedimiento de mejora.

Se pueden incluir en este grupo las propuestas de (Khare, Khare y Neema,1988), (Malakooti y Tsurushima,1989), (Houshyar,1991), (Harmonosky y Tothoro,1992), (Sarin et al. 1992), (Raoot y Rakshit,1993), (Badiru y Arif,1996), (Deb y Bhattacharyya,2003), (Chen y Sha,2005), (Sangwan y Kodali,2006) y (Khilwani, Shankar y Tiwari,2008).

2.2 Clasificación de Malakooti

Malakooti (1989) realiza una segunda clasificación de las técnicas multiobjetivo aplicadas al problema de distribución, considerando el momento en el que se tiene en cuenta el carácter multicriterio del problema.

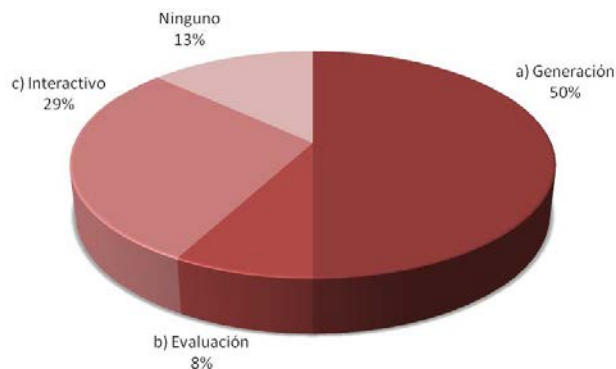
Figura 3: Clasificación de técnicas de Malakooti.



Esta es la clasificación que mayor número de referencias tiene en la bibliografía, y en ella, el autor describe tres grandes grupos de técnicas: en primer lugar están aquellas que generan una serie de soluciones que son eficientes sin centrarse en cual de todas ellas es la óptima. En segundo lugar están las técnicas en las que se evalúa en primer lugar los pesos que hay que darle a cada uno de los objetivos, para pasar después a optimizar la función objetivo con los pesos obtenidos. Por último se describen métodos interactivos entre expertos y diseñador, que tienen en cuenta el carácter multiobjetivo del problema en el proceso de generación de la solución.

Al igual que se hizo con la clasificación anterior, las técnicas se distribuyen en los distintos grupos tal y como se muestra en la siguiente figura, destacando que la mayor parte de las referencias se enclavan en la generación de soluciones eficientes.

Figura 4: Distribución de artículos según clasificación de Malakooti.



- **Generación de un conjunto de soluciones eficientes:** En este primer grupo de metodologías, se generan un conjunto de soluciones eficientes que posteriormente son presentadas a un panel de expertos o similar para su clasificación. La mayor parte de referencias encontradas en la bibliografía se encuentra en este primer enfoque, en el que se generan soluciones que, atendiendo a diferentes objetivos (generalmente dos, uno cuantitativo y otro cualitativo), son eficientes o no dominadas.

La generación de soluciones puede realizarse mediante la agregación de los criterios en una sola función objetivo o mediante técnicas Pareto. Dentro de este grupo se incluyen las siguientes referencias: (Rosenblatt,1979), (Dutta y Sahu,1982), (Fortenberry y Cox,1985), (Waghodekar y Sahu,1986), (Urban,1987), (Urban,1989), (Malakooti,1989), (Harmonosky y Tothero,1992), (Sarin et al.,1992), (Suresh y Sahu,1993), (Islir,1998), (Chen y Sha,1999), (Sha y Chen,2001), (Aiello, Enea y Galante,2006), (Tuzkaya, Ertay y Ruan,2005), (Logendran y Kriausakul,2006), (Ye y Zhou,2007) y (Sahin y Türkbey,2009).

- **Evaluación previa de los pesos de los objetivos:** En un segundo grupo, Malakooti agrupa todas aquellas técnicas en las que se comienza evaluando las preferencias del panel de expertos, generando los pesos para cada uno de los criterios y poder obtener así la mejor solución. Malakooti y D'Souza (1987) desarrollaron una metodología de comparación de pares basada en la intensidad de preferencia entre soluciones, generando los pesos de los objetivos mediante una función que asume lineal. Posteriormente, otros autores han aplicado ésta misma técnica, como (Meller y Gau,1996) y (Chen y Sha,2005).
- **Método interactivo para encontrar la mejor solución:** Por último, el tercer grupo de técnicas se engloban las metodologías en las que se presenta un proceso interactivo, que requiere las respuestas del experto a ciertas cuestiones establecidas por el programador, obteniendo tanto los pesos como la obtención de la mejor solución. La primera referencia de este tipo, aunque no aplicada al problema de distribución en planta se encuentra en (Malakooti y Ravindran,1985), pudiendo también encontrar técnicas similares en: (Khare, Khare y Neema,1988), (Malakooti y Tsurushima,1989), (Houshyar,1991), (Raoot y Rakshit,1993), (Shang,1993), (Badiru y Arif,1996), (Deb y Bhattacharyya,2003), (Aiello, Enea y Galante,2006), (Sangwan y Kodali,2006) y (Khilwani, Shankar y Tiwari,2008).

Algunas de las referencias encontradas no se pueden enmarcar en ninguno de estos grupos, bien porque se trate de aproximaciones de evaluación de soluciones, o porque la técnica no se ajuste a ninguna de las anteriormente descritas:(Rosenblatt y Sinuany-Stern,1986), (Cambron y Evans,1991), (Lin y Sharp,1999), (Yang y Kuo,2003) y (Yang y Hung,2007).

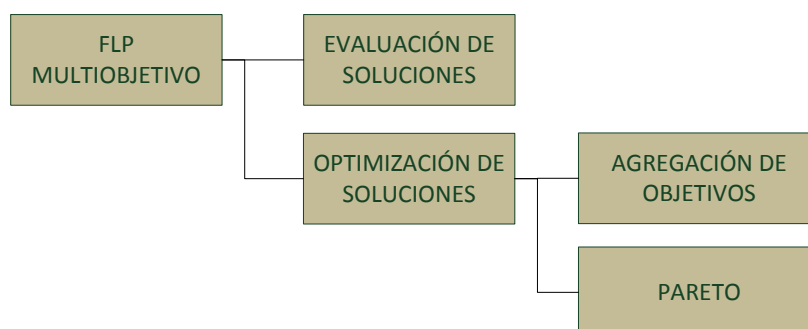
3. Clasificación propuesta

En el estudio de las diferentes referencias publicadas en el ámbito del problema de distribución en planta multiobjetivo, el autor ha decidido estructurar y organizar las mismas atendiendo a una clasificación diferente a las comentadas anteriormente.

En un primer nivel, se distribuyen las publicaciones en dos grandes grupos en función de la forma en la que se aborda el problema:

- Evaluación de Soluciones: En un primer grupo se incluyen las referencias que tienen como objetivo fundamental determinar la mejor de las soluciones de un conjunto de layouts generados mediante cualquier técnica de construcción.
- Optimización de Soluciones: En este segundo grupo se incluyen todas las referencias que tienen como objetivo la generación de soluciones optimizadas a partir de un layout original. Todas estas técnicas se pueden clasificar en función de cómo se realiza la optimización bien a través de una función objetivo en la que se agregan todos los objetivos o bien se afronta el problema como multiobjetivo a través de un conjunto de soluciones que conforman la frontera de Pareto.

Figura 5: Clasificación de técnicas propuesta.



3.1 Evaluación de soluciones

Algunos autores se han acercado al problema de distribución en planta desde el punto de vista de la selección de diferentes alternativas (o evaluación de soluciones). En sus propuestas, se generan una serie de soluciones, mediante cualquier técnica de generación existente y posteriormente se evalúan, obteniendo de entre las soluciones generadas la mejor atendiendo a los diferentes objetivos.

Las referencias de la bibliografía que podemos enmarcar dentro de este grupo son las siguientes: (Malakooti y Tsurushima,1989), (Cambron y Evans,1991), (Lin y Sharp,1999), (Yang y Kuo,2003) y (Ye y Zhou,2007).

3.2 Optimización de soluciones

Gran parte de los autores que se han aproximado al problema de distribución en planta desde un punto de vista multiobjetivo, lo hacen desde una de las formulaciones del problema como es la del Quadratic Assignment Problem (QAP) y más concretamente en el QAP monocasilla. Este problema fue planteado en (Koopmans y Beckman,1957) y en el mismo se deben asignar n actividades a n localizaciones, de manera que el coste total resultante del producto de los flujos por las distancias entre actividades sea mínimo. En el problema generalizado las áreas de las n actividades pueden tener valores distintos, sin embargo en el problema monocasilla son iguales, de valor unidad y de geometría cuadrada.

En este tipo de formulación, cada actividad solo puede ser asignada a una localización, no permitiendo la superposición de las mismas. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de un problema de asignación para n=5 formulado como un QAP.

Figura 6: Actividades, Localizaciones y Asignación de actividad a localización para n=5.

1	2	3
4	5	

a	b	c
d	e	

1,a	5,b	4,c
3,d	2,e	

La formulación QAP del problema de distribución en planta, exige la definición de una variable de decisión o asignación de acuerdo con la siguiente expresión:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la actividad } i \text{ está en la localización } k. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (1)$$

La nomenclatura que se emplea en la formulación del QAP generalizado establecida por Francis y White (1974):

- n Número de actividades.
- u_b Número de localizaciones.
- A_i Área total de la actividad i
- a_{ik} Coste de colocar la actividad i en la localización k.
- f_{ij} Flujo de materiales entre la actividad i y la act. j para un periodo de referencia.
- c_{ij} Coste de transporte por unidad de distancia, una unidad de producto desde la actividad i a la actividad j.
- d_{kl} Distancia de la localización k a la localización l.

Con las siguientes consideraciones:

- a_{ik} incluye exclusivamente el coste de instalación.
- f_{ij} es independiente de la localización de las actividades.
- c_{ij} es independiente de las actividades, depende del sistema de manutención.

Con todas las consideraciones y nomenclatura anteriormente expuesta, la formulación del problema de distribución en planta como un QAP generalizado queda de la siguiente forma:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{ub} a_{ik} \cdot x_{ik} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{ub} \sum_{l=1}^{ub} f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_{kl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (2)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{k=1}^{ub} x_{ik} = A_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, ub \quad (4)$$

$$x_{ik} = x_{ik}^2 \quad (5)$$

El primer término de la expresión (2) computa el coste de asignar la actividad i a la localización k , es lo que se llama el coste de instalación. Este término se considera nulo en todas las formulaciones multiobjetivo del problema de distribución en planta encontradas en la bibliografía.

El segundo término de la expresión (2), computa el coste de transporte de materiales entre las actividades i y j , cuando están localizadas en las posiciones k y l , esta forma de plantear el problema en términos de coste de transporte es una formulación cuantitativa.

Las restricciones de esta formulación del problema se interpretan de la siguiente forma:

- (3) establece que para cada una de las n actividades, la suma de celdas que ocupa la actividad debe ser igual al área de la actividad (cada casilla es una unidad de área). Esta restricción se simplifica para el caso del QAP monocasilla, pues el valor de $n_i=1$.
- (4) vela por la no superposición de actividades en una misma celda, por ello la suma de las variables de asignación de las n actividades en cada una de las k localizaciones debe ser igual a la unidad.
- (5) es la variable de asignación, es una manera simplificada de la ecuación (1).

En las formulaciones QAP multiobjetivo del FLP revisadas en toda la bibliografía, el coste de implantación es nulo, y en la mayor de ellas, se reducen al modelo monocasilla ($n=ub$), que puede ser reducida a la siguiente expresión:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n m_{ijkl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (6)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

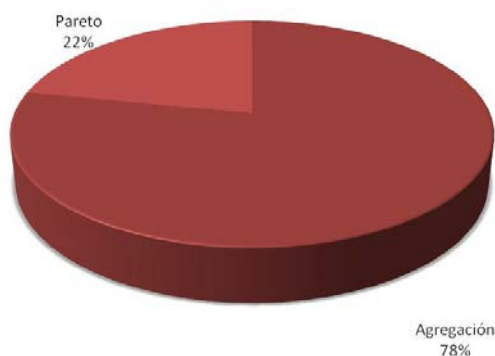
$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$x_{ik} = x_{ik}^2 \quad (9)$$

En la que m_{ijkl} es la función objetivo del problema, en el caso monobjetivo cuantitativo de la formulación del QAP $m_{ijkl}=a_{ijkl}=f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_{kl}$, y en el resto de aproximaciones multiobjetivo varía tal y como se mostrará posteriormente. Esta misma formulación del problema es válida, para el caso monocasilla y en aquellas situaciones en las que el coste de instalación de la actividad no fuera nulo, empleando la función objetivo: $m_{ijkl}=a_{ijkl}=c_{ik} + f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_{kl}$. Donde c_{ik} es el coste de implantar la actividad i en la posición k .

Figura 7: Distribución de artículos según clasificación propuesta.



3.2.1 Métodos basados en funciones agregadas

Tal y como se mostró en la figura 7, la mayor parte de las publicaciones de la bibliografía quedan enmarcadas en este grupo, en el que los objetivos son agregados en una función objetivo. La agregación de objetivos se realiza bien mediante una función aditiva o mediante una función multiplicativa. La formulación del problema más empleada es la del QAP monocasilla mostrada en la ecuación (2), y la diferencia estriba en la función objetivo m_{ijkl} .

Figura 8: Optimización mediante funciones objetivo obtenidas por agregación.



Función objetivo agregada aditiva

En este tipo de aproximaciones, se deben obtener en primer lugar los pesos de los m objetivos (ω_u), cumpliéndose en la mayor parte de los casos que la suma de los mismos sea igual a la unidad. Una vez obtenidos los pesos, todos ellos se agregan obteniendo un único valor de la función objetivo m_{ijkl} que debe ser minimizada, en general:

$$m_{ijkl} = \sum_{u=1}^m \omega_u \cdot f_{ijkl,u} \quad (10)$$

Donde: ω_u Es el peso de objetivo u -ésimo.

$f_{ijkl,u}$ Es el valor del objetivo u -ésimo.

Dentro de los métodos aditivos se pueden encontrar dos formas de realizar la ponderación de los objetivo: por un lado los autores que emplean una adición que se ha denominado “pura”, en la que los pesos no son normalizados, por tanto la suma no tiene en cuenta la posible disparidad entre las magnitudes de los objetivos, y por otro lado los métodos aditivos “normalizados”, en los que sí que se realiza una homogeneización de los distintos objetivos, para que la función a optimizar sea lo más uniforme posible.

- **Aditiva Pura:** En estas aproximaciones, la adición de los diferentes objetivos se realiza de manera ponderada sin normalizar los valores de los mismos. Las referencias que afrontan el problema de esta forma son las siguientes: (Rosenblatt,1979), (Dutta y Sahu,1982), (Waghodekar y Sahu,1986), (Malakooti y D'Souza,1987), (Malakooti,1987) (Houshyar,1991), (Suresh y Sahu,1993), (Meller y Gau,1996), (Logendran y Kriausakul,2006) y (Sangwan y Kodali,2006).
- **Aditiva Normalizada:** En estas aproximaciones, la adición de los diferentes objetivos se realiza de manera ponderada normalizando los objetivos, bien a través de los pesos o bien aplicando un paso de normalización de los datos de partida del problema. Las referencias que tienen esta forma de agregar los objetivos son las siguientes: (Urban,1987), (Khare, Khare y Neema,1988), (Urban,1989), (Harmonosky y Tothoro,1992) (Sarin et al., 1992), (Shang,1993), (Chen y Sha,1999), (Sha y Chen,2001), (Deb y Bhattacharyya,2003), (Chen y Sha,2005), (Khilwani, Shankar y Tiwari,2008) y (Singh y Singh,2010).

Función objetivo agregada multiplicativa

Una segunda forma de realizar la agregación de los objetivos en una sola función es hacerlo mediante una función multiplicativa, en la que los distintos objetivos se multiplican (o dividen), sin necesidad de ponderación entre ellos.

En estos casos, la función objetivo m_{ijkl} adopta la siguiente forma genérica para cada uno de los m objetivos:

$$m_{ijkl} = \prod_{u=1}^m f_{ijkl,u} \quad (11)$$

Donde $f_{ijkl,u}$ es el valor del objetivo u -ésimo. En la bibliografía solo se encuentran tres referencias que empleen esta formulación para resolver el problema, aunque son de un gran interés: (Fortenberry y Cox,1985), (Islir,1998) y (Wang, Hu y Ku,2005).

3.2.2 Métodos basados en frontera de Pareto

Una aproximación totalmente distinta a la comentada en apartados anteriores es considerar el problema de distribución en planta multiobjetivo desde el punto de vista de un conjunto de soluciones eficientes, o frontera de Pareto.

Es prácticamente imposible, y más en problemas de cierta entidad, que pueda existir un solo vector \bar{x} que optimice simultáneamente todos los objetivos. La noción más cercana al concepto monobjetivo de "óptimo" fue generalizada por Wilfredo Pareto en 1896.

En términos de minimización de objetivos, se dice que un vector $\bar{x} \in S$ es óptimo de Pareto si no existe otro tal que $f_i(\bar{x}) \geq f_i(\bar{x})$ para toda $i=1, \dots, m$ y $f_j(\bar{x}) > f_j(\bar{x})$ para cualquier j .

Donde S es el conjunto de soluciones factibles. Expresado de otra forma: \bar{x} es un óptimo de Pareto si no existe un vector factible de variables de decisión $\bar{x} \in S$ que produzca un decremento en alguno de los criterios sin causar un incremento simultáneo en alguno de los otros criterios.

Uno de los conceptos fundamentales de la optimización multiobjetivo basada en conjuntos de Pareto es el de dominancia de Pareto. Se dice que un vector \bar{x}_1 domina a otro \bar{x}_2 ($\bar{x}_1 \prec \bar{x}_2$) si y solo si \bar{x}_1 es parcialmente menor a \bar{x}_2 . Expresado matemáticamente:

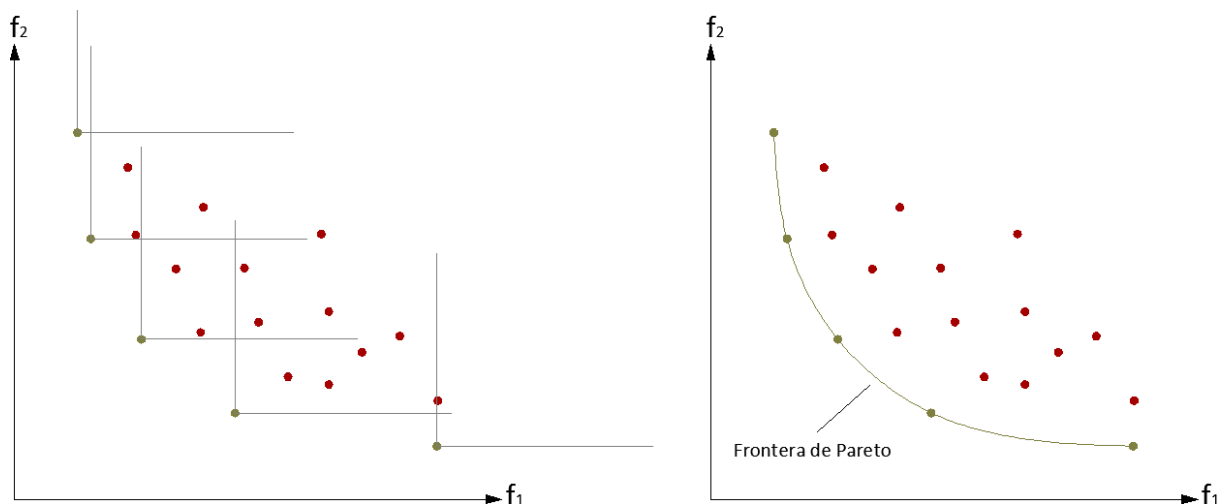
$$\bar{x}_1 \prec \bar{x}_2 \quad \text{si} \quad \forall i, k \in \{1, \dots, m\}, \quad f_i(\bar{x}_1) \leq f_i(\bar{x}_2) \wedge \exists k : f_k(\bar{x}_1) < f_k(\bar{x}_2) \quad (12)$$

Para un problema multiobjetivo dado $\text{Min} [f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_m(\bar{x})]$, el conjunto óptimo de Pareto P se define como:

$$P = \{ \bar{x} \in S \mid \nexists \bar{x}' \in S : \bar{x}' \prec \bar{x} \} \quad (13)$$

Por tanto, el conjunto de Pareto de un determinado problema está formado por todas aquellas soluciones \bar{x} que no son dominadas por ninguna otra perteneciente al espacio de soluciones S . En la figura 9 los puntos marrones, pertenecen al conjunto óptimo de Pareto y los rojos son puntos dominados. A la imagen del conjunto óptimo de Pareto P sobre el espacio de funciones objetivo se le denomina frente Pareto, o frontera de Pareto.

Figura 9: Dominancia y conjunto de Pareto.



La primera publicación que trató el problema desde un punto de vista multiobjetivo fue la de Rosenblatt (1979) ya hablaba de un conjunto de soluciones eficientes, de algunas soluciones dominadas, aunque el tratamiento que se daba al proceso de optimización no era de conjunto de Pareto, pues se agregaban los objetivos para obtener directamente una solución óptima, por esta razón la he colocado en el grupo de aproximaciones mediante funciones objetivo aditivas. Aunque es de destacar que en esta primera publicación ya se hiciera hincapié en el concepto de conjunto de soluciones eficientes.

Posteriormente, distintos autores se han aproximado al problema de distribución en planta empleando esta concepto, entre los que se encuentran: (Rosenblatt y Sinuany-Stern,1986), (Malakooti,1989), (Raoot y Rakshit,1993), (Tuzkaya, Ertay y Ruan,2005), (Gonzalez,2005), (Aiello, Enea y Galante,2006), (Ye y Zhou,2007), (Sahin y Türkbey,2009) y (Montalvá,2011).

Algunas de las referencias mencionadas combinan la aproximación como frontera de Pareto con un proceso posterior de selección de alternativas, en todos los casos con ELECTRE, para determinar qué solución de la frontera es la óptima.

4. Conclusiones

En la presente contribución se ha realizado una revisión de las publicaciones que han abordado el problema de distribución en planta desde una óptica multiobjetivo, proponiendo una nueva clasificación, en la que se recogen las técnicas de optimización que consideran el problema desde una óptica del conjunto de Pareto. Una vez obtenidas las fronteras de Pareto se podrían aplicar técnicas de decisión multicriterio (AHP, ELECTRE...) para determinar cual de todas las soluciones de la frontera es la óptima.

La misma pretende servir de herramienta para los investigadores que quieran acercarse al problema atendiendo a múltiples objetivos, una línea de trabajo que permanece muy activa y en la que los autores continúan trabajando.

4 Referencias

- Aiello, G., Enea, M., & Galante, G. (2006). A multi-objective approach to facility layout problem by genetic search algorithm and Electre method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(5-6), 447-455. doi: 10.1016/j.rcim.2005.11.002.
- Armour, G., & Buffa, E. (1963). A heuristic algorithm and simulation approach to the relative location of facilities. *Management Science*, 9, 294-309.
- Badiru, A. B., & Arif, A. (1996). FLEXPART: facility layout expert system using fuzzy linguistic relationship codes. *IIE Transactions*, 28(5), 295-308.
- Cambron, K. E., & Evans, G. W. (1991). Layout design using the Analytic Hierarchy Process. *Computers & industrial engineering*, 20(2), 211-229. doi: 10.1016/0360-8352(91)90026-3.
- Chen, C., & Sha, D. (1999). A design approach to the multi-objective facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 37(5), 1175-1196.
- Chen, C., & Sha, D. (2005). Heuristic approach for solving the multi-objective facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 43(21), 4493-4507. doi: 10.1080/00207540500056383.
- Deb, S., & Bhattacharyya, B. (2003). Facilities layout planning based on fuzzy multiple criteria decision-making methodology. *International Journal of Production Research*, 41(18), 4487-4504. doi: 10.1080/00207540310001595837.
- Dutta, K. N., & Sahu, S. (1982). A multigoal heuristic for facilities design problems: MUGHAL. *International Journal of Production Research*, 20(2), 147-154.
- Fortenberry, J. C., & Cox, J. F. (1985). Multiple criteria approach to the facilities layout problem. *International Journal of Production Research*, 23(4), 773-782.
- Francis, R. L., & White, J. A. (1974). *Facility Layout and Location, an analytical approach*. Prentice-Hall.
- Gilmore, P. (1962). Optimal and suboptimal algorithms for the quadratic assignment problem. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 10(2), 305-362.
- González, J. L. (2005). *Aportación a la optimización multiobjetivo del diseño de plantas industriales*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Harmonosky, C. M., & Tothoro, G. K. (1992). A multi-factor plant layout methodology. *International Journal of Production Research*, 30(8), 1773-1789.
- Hillier, F. (1963). Quantitative tools for plant layout analysis. *The Journal of Industrial Engineering*, 14(1), 33-40.
- Hillier, F., & Connors, M. (1966). Quadratic Assignment problem algorithms and the location of indivisible facilities. *Management Science*, 13(1), 42-57.
- Houshyar, A. (1991). Computer aided facility layout: an interactive multi-goal approach. *Computers & industrial engineering*, 20(2), 177-186. doi: 10.1016/0360-8352(91)90023-Y.
- Islier, A. (1998). A genetic algorithm for multiple criteria facility layout design. *International Journal of Production Research*, 36(6), 1549-1569.
- Khalil, T. (1973). Facilities relative allocation technique (FRAT). *International Journal of Production Research*, 11(2), 183-194.
- Khare, V., Khare, M., & Neema, M. (1988). Combined computer-aided approach for the facilities design problem and estimation of the distribution parameter in the case of multigoal

- optimization. *Computers & industrial engineering*, 14(4), 465-476. doi: 10.1016/0360-8352(88)90048-4.
- Khilwani, N., Shankar, R., & Tiwari, M. (2008). Facility layout problem: an approach based on a group decision-making system and psychoclonal algorithm. *International Journal of Production Research*, 46(4), 895-927. doi: 10.1080/00207540600943993.
- Koopmans, T., & Beckman, M. (1957). Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica*, 25(1), 53-76.
- Lawler, E. (1963). The quadratic assignment problem. *Management Science*, 9(4), 586-599.
- Lee, R., & Moore, J. (1967). CORELAP - COmputerized RELationship LAYout Planning. *The Journal of Industrial Engineering*, 18(3), 195-200.
- Lin, L., & Sharp, G. (1999). Quantitative and qualitative indices for plant evaluation problem. *European Journal of Operational Research*, 116 (1), 100-117. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00046-0.
- Lin, L., & Sharp, G. (1999). Application of the integrated framework for the plant layout evaluation problem. *European Journal of Operational Research*, 116(1) 118-138. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00174-X.
- Logendran, R., & Kriausakul, T. (2006). A methodology for solving the unequal area facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 44(7), 1243-1272. doi: 10.1080/00207540500336314.
- Malakooti, B. (1987). Computer-Aided facility layout selection (CAFLAS) with applications to multiple criteria manufacturing planning problems. *Large scale systems*, 12(2), 109-123.
- Malakooti, B. (1989). Multiple objective facility layout: a heuristic to generate efficient alternatives. *International Journal of Production Research*, 27(7), 1225-1238.
- Malakooti, B., & D'Souza, G. (1987). Multiple objective programming for the quadratic assignment problem. *International Journal of Production Research*, 25(2), 285-300.
- Malakooti, B., & Ravindran, A. (1985). Experiments with an interactive paired comparison simplex method for mlp problems. *Annals of Operations Research*, 5(3), 575-597.
- Malakooti, B., & Tsurushima, A. (1989). An expert system using priorities for solving multiple-criteria facility layout problems. *International Journal of Production Research*, 27(5), 793-808.
- Matai, R., & Singh, S. (2008). Multi-objective facility layout problem: A state of the art review paper. *Sixth AIMS International conference on management*, 28-31 december 2008.
- Meller, R., & Gau, K. (1996). Facility layout objective functions and robust layouts. *International Journal of Production Research*, 34(10), 2727-2742.
- Montalvá, J. M. (2011). *Optimización multiobjetivo de la distribución en planta de procesos industriales. Estudio de objetivos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Muther, R. (1968). *Planificación y proyección de la empresa industrial (Método SLP)*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- Raoot, A., & Rakshit, A. (1993). A 'linguistic pattern' approach for multiple criteria facility layout problems. *International Journal of Production Research*, 31(1), 203-222.
- Rosenblatt, M. (1979). The facilities layout problem: a multi-goal approach. *International Journal of Production Research*, 17(4), 323-332.
- Rosenblatt, M. J., & Sinuany-Stern, Z. (1986). A discrete efficient frontier approach to the plant layout problem. *Material Flow*, 3, 227-281.

- Sahin, R., & Türkbey, O. (2009). A simulated annealing algorithm to find approximate Pareto Optimal solutions for the multi-objective facility layout problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(9-10), 1003-1018. doi: 10.1007/s00170-008-1530-5.
- Sangwan, K., & Kodali, R. (2006). Multicriteria heuristic model for design of facilities layout using fuzzy logic and AHP. *International journal of industrial engineering: theory applications and practice*, 13(4), 364-373.
- Sarin, S. C., Loharjun, P., Malmborg, C. J., & Krishnakumar, B. (1992). A multiattribute decision-theoretic approach for the layout design problem. *European Journal of Operational Research*, 57(2), 231-242. doi: 10.1016/0377-2217(92)90045-B.
- Sayin, B. (1981). *Facilities Layout with multiple objectives*. Tesis doctoral no publicada, North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Seehof, J., & Evans, W. (1967). Automated Layout Design Program. *The Journal of Industrial Engineering*, 18(12), 690-695.
- Sha, D., & Chen, C.-W. (2001). A new approach to the multiple objective facility layout problem. *Integrated Manufacturing Systems*, 12(1), 59-66. doi: 10.1108/09576060110361546.
- Shang, J. S. (1993). Multicriteria facility layout problem: An integrated approach. *European Journal of Operational Research*, 66(3), 291-304. doi: 10.1016/0377-2217(93)90218-C.
- Singh, S., & Singh, V. (2010). An improved heuristic approach for multi-objective facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 48(4), 1171-1194, doi:10.1080/00207540802534731
- Suresh, G., & Sahu, S. (1993). Multiobjective facility layout using simulated annealing. *International journal of production economics*, 32(2), 239-254. doi: 10.1016/0925-5273(93)90071-R.
- Tuzkaya, U. R., Ertay, T., & Ruan, D. (2005). Simulated annealing approach for the multi-objective facility layout problem. *Studies in Computational Intelligence*, 5, 401-418. doi: 10.1007/11004011_20.
- Urban, T. L. (1987). A multiple criteria model for the facilities layout problem. *International Journal of Production Research*, 25(12), 1805-1812.
- Urban, T. L. (1989). Combining qualitative and quantitative analyses in facility layout. *APICS Production and inventory management journal*, 3, 73-77.
- Waghodekar, P., & Sahu, S. (1986). A critique of some current plant layout techniques. *International journal of operations & production management*, 6(1), 54-61.
- Waghodekar, P., & Sahu, S. (1986). Facilities layout with multiple objectives: MFLAP. *Engineering costs and production economics*, 10(2), 105-112. Doi:1 0.1016/0167-188X(86)90004-2.
- Wang, M., Hu, M., & Ku, M. (2005). A solution to the unequal area facilities layout problem by genetic algorithm. *Computers in Industry*, 56(2), 207-220. doi: 10.1016/j.compind.2004.06.003.
- Yang, T., & Hung, C.-C. (2007). Multiple-attribute decision making methods for plant layout design problem. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(1), 126-137. doi: 10.1016/j.rcim.2005.12.002.

Yang, T., & Kuo, C. (2003). A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 128-136. doi: 10.1016/S0377-2217(02)00251-5.

Ye, M., & Zhou, G. (2007). A local genetic approach to multi-objective, facility layout problems with fixed aisles. *International Journal of Production Research*, 45(22), 5243-5264. doi: 10.1080/00207540600818179.

Correspondencia (Para más información contacte con): jmonsu@cst.upv.es

Secretaría XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos.

Phone: + 34 96 387 70 00 Ext. 75685 / 79172

Fax: + + 34 96 387 91 73

E-mail: congresoalencia2012@aeipro.com

URL: <http://www.congresoaeipro2012.es>