

La Localización Industrial y su Optimización en el Diseño en Espacios Discretos

Eloy Damas Rico⁽¹⁾p, y Manuel Zafra Cobo⁽²⁾

Dpto. de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos. Escuela Politécnica. Univ. de Jaén

RESUMEN

Desde que Alfred Weber comenzó sus estudios de localización, estableciendo modelos complejos, como eran sus célebres *curvas isodapanas*, el interés por conseguir modelos de localización que ayuden a establecer el diseño de un sistema productivo óptimo han sido muchas y muy fructíferas, así los modelos basados en el concepto de centro de gravedad, de los factores ponderados, los que parten del concepto de punto de equilibrio económico etc.

Estos modelos no son más que herramientas que utiliza el redactor del proyecto para poder resolver los problemas de decisión que tiene en un momento dado.

Como cualquier problema de decisión la mayor parte de los casos puede ser atacado por medio de técnicas de programación matemática de una manera clásica. De tal forma que lo que se busca y se establece, en un principio, es un conjunto de soluciones posibles o factibles del problema de diseño analizado. En segundo lugar, basándose en algún criterio, se asocia a cada solución o alternativa un número que representa un grado de deseabilidad que tiene cada alternativa para el centro de diseño. Esta estructura, que acabamos de comentar tiene una gran solidez desde el punto de vista lógico, de modo que su coherencia interna podemos decir que es perfecta.

Existe otro problema empírico relacionado con el problema decisional que hemos relacionado anteriormente que es el considerar que las restricciones que se les impone al problema de optimización, y que definen el conjunto de soluciones factibles, son restricciones rígidas, son ataduras que no pueden violarse y esto no es en la mayoría de los casos realista. Puede ocurrir, y en la mayoría de los casos así ocurre, que las condiciones que se le impone a la posible solución, a la función objetivo, son absolutamente antitéticas de manera que si se cumple una restricción de las impuestas no es posible el cumplir las otras o alguna de las otras.

(1) Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos. Universidad de Jaén. E-mail edamas@ujaen.es

(2) Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos. Universidad de Jaén. E-mail: mzafra@ujaen.es

La intención de esta comunicación es la de poner en conocimiento de esta comunidad intelectual la potencialidad de estas técnicas decisionales multicriterio en el proceso de diseño y proyectual, así como parte de las herramientas analíticas disponibles para la llevar a cabo esta meta. Para eso vamos a exponer algunos conceptos básicos previamente.

ABSTRACT

Classical optimisation theory has been, up to now, the only tool for engineers in their tasks as designers and planners. Conceptually, a technical designer develops systems aiming to reach a wide range of different nature objectives, so that, in many cases these different objectives may come into conflict with each other being necessary to find a compromise or an appropriate balance among them. As system complexity grows the decision-making analysis, inherent to design and project processes, it becomes more difficult, involving a greater number of objectives.

1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de las veces la resolución de un problema de localización de un proyecto industrial, con ciertas garantías de acierto, se queda en la aplicación de un simple modelo de dimensión óptima al que se le tiene en cuenta unos cuantos factores de localización como puedan ser el grado de disponibilidad de mano de obra, las comunicaciones existentes o el ambiente industrial de la zona y las posibles economías externas de la misma.

Sin embargo, hay ocasiones en las que la elección no se puede hacer tan fácilmente y de una manera tan drástica y apriorística, sobre todo cuando las posibles zonas candidatas a albergar el proyecto son muchas y se distribuyen sobre un gran territorio.

Desde que Alfred Weber comenzó sus estudios de localización, estableciendo modelos complejos, como eran sus célebres *curvas isodapanas*, el interés por conseguir modelos de localización que ayuden a establecer el diseño de un sistema productivo óptimo han sido muchas y muy fructíferas, así los modelos basados en el concepto de centro de gravedad, de los factores ponderados, los que parten del concepto de punto de equilibrio económico etc.

Estos modelos no son más que herramientas para poder resolver los problemas de decisión que un centro, en nuestro caso el redactor del proyecto, tiene en un momento dado, A la hora de buscar una buena localización al proyecto, el problema en el diseño consistente en la búsqueda de la mejor ubicación posible para la planta industrial.

Como cualquier problema de decisión la mayor parte de los casos puede ser atacado por medio de técnicas de programación matemática de una manera clásica. De tal forma que lo que se busca y se establece, en un principio, es un conjunto de soluciones posibles o factibles del problema de diseño analizado. En segundo lugar, basándose en algún criterio, se asocia a cada solución o alternativa un número que representa un grado de deseabilidad que tiene cada alternativa para el centro de diseño, es decir, se establece una ordenación de las soluciones factibles. Por último mediante técnicas más o menos sofisticadas, generalmente técnicas de optimización matemáticas, se procede a encontrar de entre todas las soluciones factibles la que posea un mayor grado de deseabilidad. Esta será la solución óptima.

En este tipo de problemas, las soluciones posibles son las que satisfacen las restricciones del mismo. De manera que, ordenándolas con arreglo a un criterio que satisfaga la preferencia del centro decisor. Esta función que representa el criterio de este centro decisor recibe el nombre de función objetivo. Recurriendo a técnicas matemáticas de cierta sofisticación, se encuentra una solución óptima, que definimos como aquella que hace que la función objetivo alcance un valor óptimo, generalmente un máximo o un mínimo.

Esta estructura, que acabamos de comentar tiene una gran solidez desde el punto de vista lógico, su coherencia interna se puede decir que es perfecta.

Pero no es esto es lo que ocurre normalmente. Desde un punto de vista empírico, el proceso descrito anteriormente presenta importantes debilidades, que lo desvía considerablemente de los procesos reales de toma de decisiones. En muchos casos los centros decisionales, es decir los centros del diseño, no están interesados en ordenar soluciones factibles con arreglo a un solo y único criterio sino que desean efectuar esta tarea con arreglo a diferentes criterios que reflejan sus preferencias.

Además, existe otro problema empírico relacionado con el problema decisional que hemos relacionado anteriormente y no es más que el considerar que las restricciones que se les impone al problema de optimización, y que definen el conjunto de soluciones factibles son restricciones rígidas, son ataduras que no pueden violarse y esto no es en la mayoría de los casos realista. Puede ocurrir, y en la mayoría de los casos así ocurre, que las condiciones que se le impone a la posible solución, a la función objetivo, son absolutamente antitéticas de manera que si se cumple una restricción de las impuestas no es posible el cumplir las otras o alguna de las otras, por ejemplo, si a la ubicación o localización de un proyecto se le impone la condición de minimizar el impacto ambiental y a la vez le obligamos a minimizar el gasto en medidas correctoras.

En definitiva, las decisiones que se toman por parte de los centros decisionales, en nuestro caso por los centros de diseño, se han entendido siempre como entes abstractos que se comportan de una manera definida, paradigma tradicional, y sin embargo en el proceso de diseño, distan mucho de comportarse como centros de carne y hueso que pueblan el mundo en que vivimos.

El análisis multicriterio constituye un instrumento para mejorar la comprensión de los procesos de decisión que están detrás de los procesos de diseño en los procesos sintéticos, así como para abordar la necesaria comparación entre las diferentes alternativas.

2 Las Técnicas Decisionales Multicriterio

Un problema de decisión multicriterio es aquel en el que puede identificarse los siguientes elementos: (Mena y Salguero, 1999; 323-331)

- a) Una o varias decisiones
- b) Un conjunto de alternativas o posibles soluciones al problema que se plantea.
- c) Un conjunto de criterios, objetivos, atributos, metas, etc., en los que el o los decisores se basaran para seleccionar una alternativa que sea la mejor o alternativa óptima. En nuestro caso la localización óptima de un proyecto de ingeniería.
- d) Una valoración de dicha alternativa, será las funciones de preferencia subjetiva del decisor y de los otros elementos que le puedan influenciar.

El modo de operar será el establecimiento de una matriz decisional, con tantas filas como alternativas de solución se proponga, en nuestro caso, las posibles

localizaciones y tantas columnas como criterios o atributos de decisión se planteen la localización.

Los elementos de la matriz, representan las valoraciones de esas alternativas por el centro o los centros decisores, de acuerdo con los criterios que haya previamente establecido. Estas valoraciones pueden ser números enteros o conjuntos borrosos que nos dicen hasta que punto el decisor no tiene totalmente definidas estas valoraciones, y que serán el reflejo de la incertidumbre que tiene el decisor para valorar una determinada alternativa, bajo un criterio.

Los criterios pueden ser ponderados por el decisor asignándole un peso, el vector de ponderación del problema, que nos permite comparar este criterio con todos los demás.

Lo que se busca es el conjunto de localizaciones posibles, ordenado según la opinión del centro decisor, teniendo en cuenta la valoración realizada según los criterios del problema, así como las ponderaciones de los mismos que se han realizado.

Expuesto así el problema de decisión multicriterio, se generan una serie de métodos para abordar el problema, según sea el enfoque con que se haga la optimización multicriterio: el enfoque iterativo multicriterio, la teoría de la utilidad multicriterio y los métodos de decisión multicriterio discretos.

El primero de ellos considera que el conjunto de alternativas es continuo, siendo un ejemplo de ello la programación compromiso y la programación por metas.

En nuestro caso, desde el punto de vista práctico, el problema decisional de la localización, se abordará con los métodos discretos, ya que, como hemos referido anteriormente el espacio donde nos movemos es un espacio discreto puesto que el conjunto de alternativa de localización, de localizaciones a considerar, es finito y generalmente no muy elevado.

El método más conocido es el Electora I, en el que el resultado obtenido se realizará mediante el dibujo de un grafos de sobrecalificación para cada criterio, de modo que aparecerá la localización obtenida.

Fundamentalmente, el modelo, se basa en el cálculo de dos tipos de medidas que serán los índices de concordancia y discordancia, que nos permitirá poder discernir el grado en que una solución es mejor que otra. Aplicación a la Localización Industrial Supongamos que el proyecto de una planta industrial tienen cinco posibles localizaciones, A, B, C, D y E, de modo que se pretende buscar la mejor localización

posible sobre la base de cinco factores locacionales, que en opinión del equipo de diseño del proyecto son los factores determinantes.

Los factores locacionales que el centro de decisión ha considerado determinantes son: el coste de las instalaciones, la distancia de la planta al mercado de materias primas, el volumen de empleo que absorberá la planta, la demanda previsible del mercado del producto o productos que se van a producir y por último, una valoración del impacto medioambiental que se puede producir con la implantación de la factoría en cada uno de las posibles localizaciones y que se ha traducido en un índice elaborado por un panel de expertos, y que engloba todos los factores ambientales del proyecto, y la fragilidad del territorio para esta actividad. La matriz decisional será la recogida en el Cuadro nº 1.

El método Electra I comenzará por establecer un orden de las posibles localizaciones, para lo cual, será preciso que el equipo de elaboración y estudio del proyecto, asigne unos pesos referenciales, que se asocian a cada uno de los factores locacionales. Es decir, establezca la importancia relativa que el factor locacional tiene en el conjunto de todos los factores locacionales.

Atributos Alternativas	Coste de instalación (millones de ptas.)	Distancia al m de origen. (Km.)	Volumen empleo de (Nº trabajadores)	Demanda futura (millones de ptas.)	Índice de Impacto ambiental
A	100	15	7	40	50
B	200	25	7	60	200
C	100	20	4	25	25
D	200	30	20	70	250
E	250	25	15	100	500

Tabla 1. Matriz Decisional

El conjunto de pesos,, estará compuesto por los pesos asociados a cada uno de los factores locacionales, supongamos que es:

$$W = \{W_1 = 0.25, W_2 = 0.25, W_3 = 0.20, W_4 = 0.10, W_5 = 0.20\} \quad [1]$$

Esto quiere decir que, por ejemplo, el equipo de diseño y redacción del proyecto considera que el coste de instalación y la distancia de la planta a los mercados de origen, o de materias primas, tiene, a la hora de elegir una localización de la planta más del doble de importancia que la posible demanda del producto.

El siguiente paso, se realizará a partir de la matriz decisional del cuadro 1 y el vector de pesos definido anteriormente [1]. Se define el índice de concordancia entre dos

alternativas como la suma de los pesos asociados a los criterios en los que una alternativa es mejor que la otra, de modo que en caso de empate, se asigna la mitad del peso a cada una de las alternativas.

Así, por ejemplo los índices de concordancia de las alternativas A y B será:

$$C(A, B) = 0 + 0 + \frac{1}{2} \cdot 0.20 + 0 + 0.20 = 0.30$$

y el de las alternativas D y A será:

$$C(D, A) = 0.25 + 0.25 + 0.20 + 0.10 = 0.80$$

Operando así con cada pareja de alternativas, podemos establecer el índice de concordancia de cada pareja de alternativas. Con todos los índices podemos establecer la matriz de índices de concordancias que en nuestro ejemplo, tomará la forma de la figura

	A	B	C	D	E
A	-	0.30	0.425	0.20	0.20
B	0.70	-	0.80	0.325	0.325
C	0.57	0.20	-	0.20	0.20
D	0.80	0.675	0.80	-	0.65
E	0.80	0.80	0.80	0.35	-

Tabla 2.- Matriz de índices de concordancia

A partir de aquí, realizaremos lo que se denomina la normalización de los elementos de la matriz. Esto lo podemos hacer dividiendo cada elemento de la matriz por su rango (diferencia entre el ideal y el antiideal para el correspondiente atributo) por ejemplo el rango A1, y el B, 3 se calcularán de la siguiente forma:

$$R(A,1) = \frac{100}{250 - 100} = 0.666 \text{ y } R(B,3) = \frac{7}{20 - 4} = 0.4375$$

La matriz decisional normalizada será:

Atributos Alternativas	Coste instalación de (millones ptas.)	Distancia al m de origen. (Km)	Volumen de empleo de (Nº trabajadores)	Demanda futura (millones de ptas.)	Indice de Impacto ambiental
A	0.666	1	0.4375	0.5333	0.1053
B	1.333	1.666	0.4375	0.80	0.4211
C	0.666	1.333	0.25	0.333	0.0526
D	1.333	2	1.25	0.933	0.7368
E	1.666	1.666	0.9375	1.333	1.0526

Tabla 3. Matriz Decisional Normalizada

Ponderamos esta matriz, multiplicando cada columna de la misma por el peso que se le dio al atributo correspondiente en [1] y nos quedara la matriz decisional normalizada que en nuestro ejemplo será:

Atributos Alternativas	Coste instalación de (millones de ptas.)	Distancia al origen. de (Km)	Volumen de empleo de (Nº trabajadores)	Demanda futura (millones de ptas.)	Indice de Impacto ambiental
A	0.166	0.2500	0.0875	0.0533	0.02106
B	0.3325	0.4167	0.0875	0.0800	0.08422
C	0.1666	0.3325	0.5000	0.0333	0.01052
D	0.3325	0.5000	0.2500	0.0933	0.14736
E	0.4150	0.4167	0.1875	0.1333	0.21052

Tabla nº 4. - Matriz de Decisional Normalizada y Ponderada

A partir de la que obtendremos los índices de discordancia d_{ik} entre las alternativas i y la k.

Al igual que el índice de concordancia, el índice de discordancia entre la alternativa i y la alternativa k, se calcula como la diferencia entre los criterios para los que la alternativa i está dominada por la j, dividiendo el resultado por la mayor diferencia en valor absoluto entre los resultados alcanzados por la alternativa i y la j, así el índice de discordancia entre A y B será:

$$d(A, B) = \frac{\max(0.166 - 0.3325; 0.25 - 0.4167; 0.0533 - 0.08)}{\max(0.1666 - 0.3325; 0.25 - 0.4167; 0.0533 - 0.08; 0.2106 - 0.0842)} = 1$$

$$d(D, A) = \frac{\max(0.1473 - 0.021)}{\max(0.3325 - 0.1666; 0.5 - 0.25; 0.25 - 0.0875; 0.093 - 0.053; 0.1473 - 0.021)} = 0.5052$$

son los índices de discordancia calculados, constituiremos la matriz de índices de discordancia, en nuestro caso:

	A	B	C	D	E
A	-	1	1	1	1
B	0.378	-	0.44	1	0.79
C	0.454	1	-	1	1
D	0.505	0.38	0.68	-	0.99
E	0.762	1	0.80	1	-

Tabla nº 5. Matriz de índices de Discordancia

A partir de este momento, el centro decisor debe de fijar un mínimo y un máximo para el umbral de discordancia y de concordancia respectivamente. Estos mínimos y máximos los definirá subjetivamente el centro decisor, motivo por el cual todos los métodos de calificación y el método Electra I, particularmente, son muy criticados,

dada la gran importancia, como veremos a continuación, tienen estos índices para el resultado final.

Supongamos que tomamos como umbral mínimo para el índice de concordancia el valor de 0,50 y como umbral máximo del índice de discordancia 0,81.

$$\bar{c} = 0.50$$

$$\bar{d} = 0.81$$

Volvemos a la matriz de índices de concordancia y a partir de ella vamos a calcular la matriz de dominancia concordante.

Los elementos de dicha matriz serán tales que si en la matriz de índices de concordancia un elemento es mayor que el umbral de concordancia definido anteriormente, en nuestro caso, el elemento homónimo será 1, si es menor será cero. Así, en el elemento $C(D,A)$ de la matriz de índices de concordancia, tiene un valor de 0.575, el mismo, en la matriz de concordancia dominante será 1, el elemento $C(A,C)$ tiene en la primera el valor de 0,425, por lo que en la segunda tendrá el valor de 0.

Calculando cada uno de los elementos, tendremos la matriz contenida en el cuadro

	A	B	C	D	E
A	-	0	0	0	0
B	1	-	1	0	0
C	1	0	-	0	0
D	1	1	1	-	1
E	1	1	1	0	-

Cuadro nº 6. Matriz de Dominancia Concordante

De la misma manera, definimos la matriz de discordancia discordante a partir de la matriz de índices de discordancia. Así, cuando un elemento de la matriz de índices de discordancia es menor que el umbral que se ha definido como máximo nivel de discordancia, escribiremos la unidad, si fuese mayor le daríamos el valor cero.

Al igual que hicimos antes la matriz de dominancia discordante será:

	A	B	C	D	E
A	-	0	0	0	0
B	1		1	0	0
C	1	0		0	0
D	1	1	1		1
E	1	0	1	0	

Tabla nº 7. Matriz de Dominancia Discordante

A partir de estas dos matrices podemos establecer la matriz de dominancia agregada (concordante – discordante), que quedará definida de la siguiente manera.

Un elemento de esta matriz tomará el valor de la unidad cuando los elementos homólogos de las dos matrices de dominancia tomen el valor uno, en cualquier otro caso tomará el valor cero.

Así definida la matriz de discordancia – concordancia será:

	A	B	C	D	E
A	-	0	0	0	0
B	1	-	1	0	0
C	1	0	-	0	0
D	1	1	1	-	1
E	1	0	1	0	-

Tabla nº 8. Matriz de Dominancia Agregada (concordante – discordante)-

¿Qué significado tiene esta matriz? ¿Cómo podemos ver cuando un elemento cualquiera de la matriz, toma el valor uno, quiere decir que la alternativa i-ésima sobrecalifica a la alternativa j-ésima?.

De aquí podemos establecer el grafo Electra, de la siguiente manera:

Los vértices del grafos serán cada una de las posibles alternativas, en nuestro caso las posibles localizaciones, de tal manera que existirá el arco ij, si y solo si el elemento correspondiente de la matriz sea la unidad.

Operando de esta manera, tendremos el grafos:

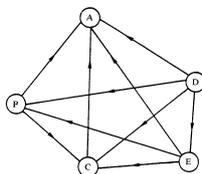


Figura nº 1 Núcleo = {D}

Que no es más que el establecimiento de una ordenación parcial de preferencias de las cinco localizaciones consideradas.

El núcleo del grafo está formado por las alternativas que no se dominan entre sí, es decir, que no se sobrecalifican, en el grafos los vértices de los que salen arcos pero no entra ninguno. En el caso que nos ocupa el núcleo estará formado por solo un vértice, el D, lo que quiere decir que la alternativa D es la única que no está dominada por otra, luego será la alternativa más favorable y la que se tendrá que escoger.

Indudablemente el modelo de decisión multicriterio descrito es mucho más consistente y mucho más elaborado, que el llamado de los factores ponderados, si bien, como ya se ha apuntado tiene una gran debilidad al considerar los umbrales de

concordancia y discordancia, elegidos de una manera subjetiva por el centro decisor, si bien esta restricción tan rígida es posible flexibilizarla sometiéndolo a un análisis de sensibilidad a estos umbrales con el fin de ver como variará el núcleo del sistema con ligeras variaciones de las umbrales.

Si en vez de haber utilizado los valores umbrales $\bar{c} = 0.50$ y, hubiésemos utilizado; $\bar{d} = 0.81$ o los, los grafos resultantes serían los de las figuras 2 y 3, con los núcleos compuestos por los conjuntos de soluciones $\{D, E\}$ y $\{B, D, E\}$ respectivamente nos confirma aún más que la alternativa mejor al problema de la localización estudiada, es la alternativa D, ya que aparece en todos los posibles núcleos, lo que se puede interpretar como que tiene una cierta superioridad de esta elección sobre las otras cuatro restantes.

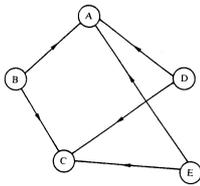


Figura 2. Núcleo $\{D, E\}$

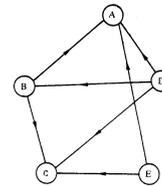


Figura 3. Núcleo $\{B, D, E\}$

Bibliografía y Referencias

- 1) Ballester, E.: *Principios de economía de la empresa*. Alianza Universidad Textos, Madrid, 1980.
- 2) Benayoun, R.; Roy, B.; Sussman, B.; Electre: *Une Methode pour Guider le Choix en Presence de Vue Multiple*. Sema (Metra International), Direction Scientifique, Note de Travail no. 49, París, 1966
- 3) Brans, J. P.; Vincke, Ph.; Mareschal, B.; *How to Select and How to Rank Projects: The PROMETHEE Methods*. European Journal of Operational Research, vol. 24, 1986, 228-238.

- 4)Goicoechea, A.; Hansen, D. R.; Duckstein, L.; *Multiobjective Decision Analysis With Engineering and Business Applications*. John Wiley and Sons, Nueva York, 1982.
- 5)Keeney, R. L.; Raiffa, H.; *Decisions With Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. John Wiley and Sons, Nueva York, 1976.
- 6)Romero, C. *Teoría de la Decisión multicriterio. Concepto, Técnicas y aplicaciones*. Alianza Universidad Textos. Madrid, 1993.
- 7)Roy, B.; *Problems and Methods with Multiple Objective Functions. Mathematical Programming, vol. 1*, 1971, 239-266.
- 8)Roy, B.; *The Outranking Approach and the Foundations of ELECTRE Methods. Theory and Decision*, vol. 31, 1991, 49-73.
- 9)Von Neumann, J.; Morgenstern, O.; *Theory of Games and Economic Behaviour*. Princeton University Press, New Jersey, 1944.
- 10)Zeleny, M.; *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw Hill, Nueva York, 1982.

Correspondencia:

E. Damas Rico.

Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos.

Escuela Politécnica. Universidad de Jaén.

Avda de Madrid, 35. 23071 Jaén.

E-mail edamas@ujaen.es