

## **Programación y compromiso. Cómo equilibrar dos objetivos, económico y ambiental, en una promoción de viviendas**

Natividad Guadalajara Olmeda<sup>a</sup> y M<sup>a</sup> José Ruá Aguilar<sup>b</sup>

---

**RESUMEN:** En la construcción de edificios entran en conflicto el objetivo económico para el usuario y el objetivo ambiental para la sociedad. La aplicación de la metodología multiobjetivo y programación compromiso puede ser útil para definir la composición óptima de viviendas en una promoción, considerando las distintas calificaciones energéticas.

---

**PALABRAS CLAVE:** Construcción, costes, eficiencia energética, programación compromiso.

---

**JEL classification:** C61, Q4, Q50.

---

**DOI:** 10.7201/earn.2015.01.07.

---

### **Compromise Programming. How balance economic and environmental criteria in a housing development**

---

**ABSTRACT:** Building with better energy performance entails a conflict between users' economic objective and society's environmental objective. Compromise Programming can be applied for the optimal allocation of such housing in a building development, considering the energy rating.

---

**KEYWORDS:** Building, Compromise programming, costs, energy performance.

---

**Clasificación JEL:** C61, Q4, Q50.

---

**DOI:** 10.7201/earn.2015.01.07.

---

---

<sup>a</sup> Centro de Ingeniería Económica. Universitat Politècnica de València.

<sup>b</sup> Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I, Castellón de la Plana.

*Dirigir correspondencia a:* Natividad Guadalajara. E-mail: [nguadala@omp.upv.es](mailto:nguadala@omp.upv.es).

Recibido en abril de 2015. Aceptado en mayo de 2015.

## 1. Introducción

La optimización multicriterio se utiliza cuando es imposible la optimización simultánea de varios criterios en conflicto. Dentro de los diferentes enfoques multicriterio, cuando el centro decisor toma sus decisiones en un contexto de objetivos múltiples, se considera la programación multiobjetivo. Con ella se intenta encontrar un conjunto de soluciones eficientes, cuyos elementos son las soluciones alcanzables, tales que no haya ninguna otra solución que, alcanzando el mismo nivel para todos los objetivos menos uno, obtenga un mejor resultado para el objetivo restante.

Dos criterios en permanente conflicto son los criterios medioambiental y económico cuando se aplican simultáneamente en distintos ámbitos, tales como la planificación del territorio agroforestal, la planificación eléctrica o la promoción de viviendas. Este último cobra especial interés en el momento actual, debido a que uno de los objetivos en la Unión Europea es la mejora de la eficiencia energética de los edificios para disminuir las emisiones de carbono a la atmósfera, según se recoge en las Directivas relativas a la eficiencia energética de los edificios (*Energy Performance of Buildings Directive*, EPBD): 2002/91/EC y 2010/31/UE y en las modificaciones contenidas en la Directiva 2012/27/UE.

En España, se ha realizado la transposición de las Directivas anteriores con distintas normativas (R.D. 314/06 del Código Técnico de la Edificación (CTE), R.D. 1027/2007, R.D. 47/2007, Orden 1635/2013 y R.D. 235/2013).

A los edificios de nueva construcción y por tanto, construidos de acuerdo al CTE, se les asigna una calificación energética dentro de una escala gradual de 5 valores, que se indican por las letras de la A a E, correspondiéndole la A a los de mejor clase energética. Estas clases se determinan en función de unos valores límite de emisiones anuales de Kg de CO<sub>2</sub> y del consumo anual de energía primaria, en kWh, que dependen de la tipología constructiva (vivienda unifamiliar o en bloque), de la zona climática y el municipio en que se encuentre la vivienda, y de la contribución solar mínima para la producción de agua caliente sanitaria en dicho municipio.

En España existen 12 zonas climáticas, según el CTE, definidas en función la demanda energética de los edificios (Ruá y Guadalajara, 2013). Cada una de las capitales de provincia españolas está adscrita a una zona y la calificación de la zona se corresponde con la de la capital provincial. La nomenclatura de zona climática está compuesta por una letra y un número, que indican la severidad de los inviernos y veranos, respectivamente. La letra A indica el invierno más suave (menos frío) y la letra E el más severo (más frío), mientras que el número 1 indica el verano más suave (menos calor) y el número 4 el verano más severo (más calor).

En general, mejores calificaciones energéticas de los edificios suponen mayores costes privados, pero menor contaminación ambiental o coste social. Por lo tanto, es imposible minimizar simultáneamente los dos objetivos: minimizar los costes privados y las emisiones de CO<sub>2</sub>. No obstante, la programación compromiso, en la que cabe destacar las aportaciones realizadas por Ballester y Romero (1991) para la métrica  $\infty$ , permite buscar una solución o combinación óptima de viviendas en una promoción, considerando ambos objetivos.

## 2. Costes y emisiones

Las emisiones de  $\text{CO}_2$  de una vivienda concreta se pueden obtener mediante los programas oficiales que existen actualmente en España: Lider v.01 para el cumplimiento de los mínimos en la limitación de la demanda energética, y Calener-VYP v1.0 (en edificios residenciales) para la determinación de la clase energética (RD 47/2007) y las emisiones de  $\text{CO}_2$ .

Por su parte, los costes privados se componen de: costes de amortización, mantenimiento y de consumo energético.

## 3. La programación compromiso

### 3.1. El conjunto eficiente

Se plantea la posibilidad de que, en una promoción de viviendas, los compradores potenciales puedan elegir viviendas con distintas calificaciones. El problema que se plantea es definir la combinación eficiente de viviendas.

Por tanto, se puede plantear el problema buscando el conjunto de soluciones eficientes ( $X_A, X_B, X_C, X_D, X_E$ ), que cumplan los dos objetivos:

$$\text{Eff } Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x)]$$

$Z_1(x)$ : objetivo de minimizar costes anuales de amortización, mantenimiento y energía, en €/m<sup>2</sup>.

$Z_2(x)$ : objetivo de minimizar las emisiones anuales de  $\text{CO}_2$ , en Kg  $\text{CO}_2/\text{m}^2$ .

Sujeto a restricciones, tal como, por ejemplo:

$X_i \leq 0,5$ , indica que como máximo habrá un 50 % de viviendas de cada calificación  $\sum X_i = 1$ .

La minimización de  $Z_1(x)$  dará como resultado un alto porcentaje de viviendas más baratas, pero por otro lado peores desde el punto de vista medioambiental. Por el contrario, la minimización de  $Z_2(x)$  dará como resultado un alto porcentaje de viviendas más caras, pero mejores desde el punto de vista medioambiental.

Los valores que optimizan cada uno de los objetivos por separado se denominan valores ideales, de tal manera que el conjunto de estos valores ideales componen las coordenadas del punto o alternativa ideal, y se representan por el vector  $(Z^*_1, Z^*_2)$ . Obviamente, este punto ideal es inalcanzable, ya que de lo contrario indicaría que no existe conflicto entre los dos objetivos.

Los peores valores de cada uno de los dos objetivos, se denominan valores antiideales, cuyo conjunto de valores componen las coordenadas del punto o alternativa no ideales, representados por el vector  $(Z_{1*}, Z_{2*})$ .

De esta forma se obtiene la matriz de pagos formada por los valores antiideales e ideales, con el fin de cuantificar el nivel de conflicto existente entre los diferentes objetivos. Así se obtienen un conjunto de soluciones Pareto óptimas o conjunto eficiente entre los valores ideal y antiideal y se consigue particionar el conjunto factible en dos subconjuntos: el subconjunto de soluciones eficientes y el subconjunto de soluciones dominadas o inferiores, lo cual se ha realizado sin tener en cuenta las preferencias del centro decisor.

La frontera de producción posible o conjunto eficiente, que separa los puntos accesibles de los inaccesibles, se puede obtener a partir de estos valores ideal y antiideal, aplicando la regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios.

### 3.2. Programación Compromiso

El punto de tangencia o intersección entre esta curva de posibilidades o conjunto eficiente y la función de utilidad social proporciona la solución óptima. Pero esta función de utilidad social es desconocida y para obtenerla habría que recurrir a encuestas a la población, lo cual resultaría muy costoso.

Este problema se puede obviar con la aplicación de la utilidad compromiso, propuesta por Yu (1973) y Zeleny (1973 y 1974). La utilidad compromiso se basa en que, si el centro decisor actúa racionalmente, la solución óptima será aquella que se encuentre más próxima al punto ideal. Esta proximidad se mide por medio del concepto matemático de distancia ( $L_\pi$ ).

Dependiendo de la métrica  $\pi$  que se elija, existirán distintas funciones de distancia, lo que permitirá establecer diferentes conjuntos compromiso. Para problemas con dos objetivos únicamente (Yu, 1973), como es nuestro caso, las mejores soluciones compromiso, o conjunto-compromiso, pertenecen al conjunto acotado por los puntos  $L_1$  (métrica  $\pi = 1$ ) y  $L_\infty$  (métrica  $\pi = \infty$ ).

Por otro lado, una vez obtenido el conjunto eficiente y eliminadas las soluciones inferiores, el siguiente paso en el proceso decisional es introducir las preferencias o pesos ( $W$ ) del centro decisor para obtener la solución óptima. Estos pesos o preferencias son desconocidos, dado que dependen de las preferencias del decisor. Una posibilidad sería asumir pesos iguales cuando los objetivos sean igualmente importantes, otra podría ser que un objetivo tuviera un peso doble al otro, etc.

Una forma de obtener la solución eficiente es minimizando las distancias normalizadas y ponderadas para cada objetivo. La solución  $L_1$  corresponde a una situación en que se minimiza la suma ponderada de los logros de cada objetivo, lo cual puede ser equivalente a un punto de máxima eficiencia.

La solución  $L_\infty$ , según demostraron Ballesteros y Romero (1991) satisface que las distancias ponderadas y normalizadas entre el valor alcanzado por cada objetivo y sus respectivos ideales son iguales. Lo que indica que se trata de una elección equilibrada entre los distintos objetivos, cosa que no ocurre con la solución  $L_1$ . Además, en el caso de una función de utilidad bicriterio (dos criterios únicamente), la condición necesaria y suficiente para que el máximo de la función de utilidad pertenezca al con-

junto eficiente para cualquier curva de transformación, es que la relación marginal de sustitución K entre los dos objetivos  $Z_1(x)$  y  $Z_2(x)$  sea igual al cociente entre los pesos o preferencias divididos por la diferencia entre los puntos ideales y antiideales.

#### 4. Resultados

En el Cuadro 1 se recogen los resultados obtenidos para una vivienda unifamiliar adosada esquinera de tres plantas, considerando precios del año 2010, unos pesos iguales para ambos objetivos, y ubicada en cada una de las 12 zonas climáticas españolas.

CUADRO 1

**Soluciones compromiso para las métricas  $L_1$  y  $L_\infty$ , y porcentajes de cada tipo de vivienda según su calificación energética**

Zona climática (ciudad)	Métrica	$(Z_1; Z_2)$	$W_1 = W_2$				
			$X_A$	$X_B$	$X_C$	$X_D$	$X_E$
A3 (Málaga)	$L_1$	(23,97; 15,10)	30	10	10	50	
	$L_\infty$	(24,47; 12,59)	43	10	10	37	
A4 (Almería)	$L_1$	(25,28; 11,33)	30	10	50	10	
	$L_\infty$	(25,04; 12,18)	25	10	50	15	
B3 (Castellón)	$L_1$	(25,38; 11,30)	10	50	30	10	
	$L_\infty$	(24,94; 14,11)	10	47	10	33	
B4 (Sevilla)	$L_1$	(25,57; 14,71)	10	50	20	10	10
	$L_\infty$	(25,10; 17,35)	10	18	50	10	12
C1 (Santander)	$L_1$	(27,21; 17,67)	10	50	10	10	20
	$L_\infty$	(27,22; 17,51)	11	50	10	10	19
C2 (Barcelona)	$L_1$	(27,22; 16,42)	10	50	10	20	10
	$L_\infty$	(27,17; 16,86)	10	50	10	16	14
C3 (Granada)	$L_1$	(25,86; 20,27)	50		10	40	
	$L_\infty$	(26,19; 18,00)	50		27	23	
C4 (Badajoz)	$L_1$	(23,93; 17,69)	50		10	40	
	$L_\infty$	(24,03; 16,58)	50		20	30	
D1 (Pamplona)	$L_1$	(28,91; 26,56)	10	50	10	10	20
	$L_\infty$	(28,95; 26,16)	11	50	10	10	19
D2 (Logroño)	$L_1$	(28,49; 25,10)	10	50	10	10	20
	$L_\infty$	(28,58; 24,12)	12	50	10	10	18
D3 (Madrid)	$L_1$	(29,11; 20,51)	50		10	40	
	$L_\infty$	(28,78; 23,39)	41		10	43	
E1 (Burgos)	$L_1$	(28,14; 21,34)	30	50	10	10	
	$L_\infty$	(28,18; 20,86)	32	48	10	10	

Fuente: Elaboración propia.

Se observa cómo, en general, los costes mínimos privados ( $Z_1$ ) y públicos ( $Z_2$ ) son menores en las zonas cálidas y se incrementan conforme se pasa a zonas más frías. Los costes anuales mínimos privados varían entre 23,97 €/m<sup>2</sup> para la zona más cálida (A3) en la métrica  $L_1$  y los 29,11 €/m<sup>2</sup> en una zona fría (D3) para la métrica  $L_\infty$ . Igualmente, las mínimas emisiones ambientales de CO<sub>2</sub> varían entre un mínimo de 11,30 kg en la zona B3 y un máximo de 26,56 kg en la zona D1.

Sin embargo, cabe destacar que, en cada zona climática, la diferencia entre los costes privados  $Z_1$  obtenidos entre las dos métricas  $L_1$  y  $L_\infty$  es muy pequeña (mínima de 0,01 €/m<sup>2</sup> en zona C1 y máxima de 0,56 €/m<sup>2</sup> en zona B3). Por el contrario, en los costes medioambientales, salvo algunas excepciones, las diferencias obtenidas entre las dos métricas son mayores (mínimo 0,16 kg en C1 y máximo 2,88 kg en D3). Lo que significa que con el uso de distintas métricas se pueden obtener reducciones importantes en emisiones con pocas variaciones del coste privado. Pero no se puede afirmar que los costes sean siempre menores en una métrica que en otra, ya que dependen de la zona climática.

## 5. Importancia de su aplicación práctica

La programación compromiso es una técnica que, aunque a priori puede parecer un poco complicada, es relativamente sencilla de aplicar y sobre todo de gran utilidad en la toma de decisiones con objetivos enfrentados, como es el caso de los objetivos ambiental y económico, cada vez más frecuentes en la actualidad.

Ha sido aplicada a distintos ámbitos, como son: la planificación del uso de la tierra (Baja *et al.*, 2007), la gestión del uso de agua potable (Fattahi y Fayyaz, 2010), o el equilibrio entre crecimiento económico de un país y la inflación (André *et al.*, 2008), y en el presente trabajo se ha expuesto su aplicación al caso de una promoción de viviendas, para establecer la distribución de viviendas con diferentes calificaciones energéticas. De esta manera, el promotor podría tomar su decisión entre un rango de valores más estrecho, compuesto por los puntos obtenidos con la solución compromiso, que el planteado en la matriz de pagos original formada por los puntos ideal y antiideal.

Esto es muy importante teniendo en cuenta la tendencia a proteger cada vez más los valores ambientales desde las administraciones. Así, la Directiva 2010/31/UE indica que los Estados miembros deben asegurar que, a más tardar el 31 de Diciembre de 2020, todos los edificios nuevos sean edificios de consumo de energía casi nulo (2018 para edificios públicos), lo cual hace pensar que la situación revertirá a favorecer cada vez más mejores calificaciones energéticas. Por tanto, desde el punto de vista del promotor, cada vez más será interesante optar por calificaciones más eficientes desde el punto de vista energético.

## Referencias

- André, F.J., Cardenete, M.A. y Romero, C. (2008). "Using compromise programming for macroeconomic policy making in a general equilibrium framework: Theory and Application to the Spanish economy". *Journal of the Operational Research Society*, 59: 875-883. <http://doi.org/b4vdgr>.
- Baja, S., Chapman, D.M. y Dragovich, D. (2007). "Spatial based compromise programming for multiple criteria decision making in land use planning". *Environmental Modeling & Assessment*, 12(3): 171-184. <http://doi.org/d47vxf>.
- Ballesteros, E. y Romero, C. (1991). "A theorem connecting utility function optimization and compromise programming". *Operations Research Letters*, 10(7): 421-427. <http://doi.org/cn99gb>.
- Directiva 2002/91/EC del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre del 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios (nº1, 04/01/2003).
- Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios (nº 153, 18/06/2010).
- Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética de los edificios (nº 315, 14/11/2012).
- Fattahi, P. y Fayyaz, S. (2010). "A Compromise Programming Model to Integrated Urban Water Management". *Water Resources Management*, 24(6): 1211-1227. <http://doi.org/fdb8s4>.
- Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía» del CTE.
- R.D. 314/2006, de 19 de octubre, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- R.D. 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.
- R.D. 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- R.D. 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico de certificación energética de los edificios.
- Ruá, M.J. y Guadalajara, N. (2013). "Application of Compromise Programming to a semi-detached housing development in order to balance economic and environmental criteria". *Journal of the Operational Research Society*, 64: 459-468. <http://doi.org/4gj>.
- Yu, P.L. (1973). "A Class of Solutions for Group Decision Problems". *Management Science*, 19(8): 936-946. <http://doi.org/btbmuj>.
- Zeleny, M. (1973). "Compromise Programming". En Cochrane, J.L. y Zeleny, M. (Eds.): *Multiple Criteria Decision Making*. University of South Carolina Press, Columbia: 262-301.

Zeleny, M. (1974). "A Concept of Compromise Solutions and the Method of the Displaced Ideal". *Computers and Operations Research*, 1(3-4): 479-496. <http://doi.org/cc57wy>.