

UNA APLICACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN MULTIOBJETIVO A LA PLANIFICACIÓN ELÉCTRICA

Pedro Linares Llamas
CIEMAT-IEE
Av.Complutense,22. 28040 Madrid

1. Introducción

La planificación energética se ha venido realizando tradicionalmente, al igual que otras muchas actividades económicas, en función de los costes del productor, al ser éstas las únicas señales válidas para el mercado. Sin embargo, la asignación de recursos en base a este criterio no siempre es eficiente, ya que existen otros costes asociados a las distintas opciones, que no aparecen reflejados en el coste de generación.

Este es el caso de los costes medioambientales. La generación eléctrica conlleva unos impactos sobre el medio ambiente que, sin embargo, no son tenidos en cuenta a la hora de asignar eficientemente los recursos, desde un punto de vista social. Esta ineficiencia hace que la alteración del medio se siga produciendo, a pesar de la cada vez mayor sensibilización por parte de la opinión pública, sin que las fuerzas del mercado sean capaces de impedirlo.

Para evitar estas debilidades del mercado, es necesario introducir otros criterios para la toma de decisiones económicas. Una de las formas de hacerlo es la aplicación de la programación multicriterio. Este método presenta la ventaja de que no es necesario determinar un valor monetario para los impactos medioambientales, ya que permite trabajar con unidades heterogéneas. Su desventaja, sin embargo, radica en que esta heterogeneidad hace necesario analizar cada caso por separado, con la complejidad analítica que ello supone, lo que sería innecesario si todos los costes estuvieran medidos en las mismas unidades monetarias.

En este ejemplo, se realiza una planificación eléctrica muy simplificada, ya que ha sido necesario hacer supuestos no siempre evidentes, que se explicarán posteriormente, para reducir la complejidad operativa. Esta simplificación se debe a que el objetivo buscado es simplemente mostrar cómo los resultados de una planificación eléctrica tradicional pueden verse alterados, si se introducen otros criterios, y su ilustración para el caso español. La introducción de los costes medioambientales se ha hecho a través de una variable asociada, como las emisiones de CO₂, ya que estas emisiones son un aspecto medioambiental de gran relevancia en la actualidad.

2. Planteamiento del problema

Se supone una demanda eléctrica anual de 150 TWh, que puede ser satisfecha mediante el empleo de las siguientes fuentes de energía: carbón, energía nuclear, gas natural, energía eólica, biomasa procedente de cultivos energéticos, y energía hidráulica. El coste de generación, así como los costes medioambientales producidos deben ser mínimos.

Las posibilidades de utilización de cada una de las opciones están determinadas por el potencial existente, o por condicionantes de otro tipo, que se detallan a continuación:

- la energía nuclear está sujeta a una moratoria que impide la expansión de la potencia instalada, con una producción anual de 53 TWh.
- respecto al gas natural, se supone una potencia máxima instalada de 1.835 MW, establecida por el Plan Energético Nacional. Suponiendo una utilización de 7.000 h al año, resulta una producción potencial de 12.845 GWh.
- el potencial de la energía eólica en nuestro país ha sido evaluado en unos 2.000 MW, que, para una utilización media de 2.500 h, produciría un máximo de 5.000 GWh.
- los recursos de biomasa utilizable para producción energética han sido estimados en 22 Mtep, que equivaldrían a unos 40 TWh de producción eléctrica.
- por último, se supone un potencial hidráulico de 31.755 GWh.

Estos supuestos simplifican bastante la operación del problema, aunque se ajustan perfectamente a la realidad. En primer lugar, se considera que toda la demanda debe ser satisfecha en base a estas opciones, sin tener en cuenta otras como el fuel-oil, la energía solar, la cogeneración, etc. En segundo lugar, la planificación se va a realizar en base a la producción, no a la potencia instalada. Para ello se consideran unas horas de utilización determinadas, lo que en lógica, debería venir definido por la posterior optimización de los costes de generación, ya que es a partir de esta optimización cuando debe calcularse el tiempo de funcionamiento, y no antes. En cualquier caso, es de esperar que los supuestos no alteren excesivamente el carácter ilustrativo de este ejercicio.

Los costes de generación que se van a utilizar son costes medios aproximados de la generación eléctrica en España, para una utilización normal durante el año, según la planificación tradicional. En la tabla 1, aparecen los costes de generación, y emisiones de CO₂ para las opciones consideradas. Para poder referirlas a la producción de electricidad, ambos vienen establecidos con relación al kWh generado. Hay que recordar que algunos costes son simplemente estimaciones. El coste del carbón corresponde al carbón importado.

Tabla 1. Costes y emisiones de CO₂ de la generación eléctrica

Fuentes de energía	Coste (ptas/kWh)	Emisiones de CO ₂ (g/kWh)
Carbón	5,85	1015
Nuclear	8,24	-
Gas natural	5,00	401
Eólica	9,00	-
Biomasa	12,00	-
Hidráulica	6,00	-

Fuente : Elaboración propia

Las tecnologías consideradas para estimar las emisiones son, para el carbón, combustión con combustible pulverizado, para el gas natural, un ciclo combinado, y para la biomasa, combustión en lecho fluidizado. En este último caso, aunque hay emisiones de CO₂

en la combustión, las emisiones netas se consideran nulas debido a la fijación previa del CO₂ por los cultivos energéticos empleados para la producción de electricidad.

Bajo estos supuestos, el planteamiento del problema es:

$$\text{Minimizar } f(x) = [f_1(x), f_2(x)]$$

donde

$$f_1(x) = (5,85 x_1 + 8,24 x_2 + 5 x_3 + 9 x_4 + 12 x_5 + 6 x_6) / \Sigma x_i \quad (\text{ptas/kWh})$$

$$f_2(x) = (1015 x_1 + 401 x_3) / \Sigma x_i \quad (\text{g/kWh})$$

sujeto a las siguientes restricciones

$$\Sigma x_i \geq 150.000 \text{ GWh}$$

$$x_i \geq 0, \forall i$$

$$x_2 \leq 53.000 \text{ GWh}$$

$$x_3 \leq 12.845 \text{ GWh}$$

$$x_4 \leq 3.100 \text{ GWh}$$

$$x_5 \leq 40.000 \text{ GWh}$$

$$x_6 \leq 31.755 \text{ GWh}$$

siendo:

x_1 : producción de electricidad en base a carbón

x_2 : producción de electricidad en base a energía nuclear

x_3 : producción de electricidad en base a gas natural

x_4 : producción de electricidad en base a energía eólica

x_5 : producción de electricidad en base a biomasa

x_6 : producción de electricidad en base a energía hidráulica

$f_1(x)$: coste de generación

$f_2(x)$: emisiones de CO₂

3. Programación multiobjetivo

En primer lugar, es necesario calcular los elementos de la matriz de pagos. Esta matriz es el resultado de optimizar cada objetivo, costes de generación y emisiones de CO₂, separadamente, asignando al otro objetivo el valor correspondiente para la solución óptima del primero. Así, se obtiene una matriz cuadrada, en la que se refleja el nivel de conflicto existente entre los objetivos.

La optimización se ha realizado con la aplicación SOLVER de la hoja de cálculo EXCEL 5.0, siendo las soluciones :

a) Al minimizar el coste $f_1(x)$, se obtiene la solución siguiente:

$$\begin{aligned} \text{coste, } f_1(x): & 5,78 \text{ ptas/kWh} \\ \text{emisiones de CO}_2, f_2(x) : & 962,42 \text{ g/kWh} \end{aligned}$$

con

$x_1 = 137.155$ GWh de carbón

$x_3 = 12.845$ GWh de gas natural

La interpretación que puede hacerse es que se utiliza el máximo de gas natural, que es el que menos coste de generación tiene, seguido por el carbón.

b) Al minimizar las emisiones de CO_2 $f_2(x)$, se obtiene:

coste $f_1(x)$: 8,40 ptas/kWh
emisiones de CO_2 $f_2(x)$: 84,41 g/kWh

con

$x_1 = 7.400$ GWh de carbón

$x_2 = 53.000$ GWh de energía nuclear

$x_3 = 12.845$ GWh de gas natural

$x_4 = 5.000$ GWh de energía eólica

$x_5 = 40.000$ GWh de biomasa

$x_6 = 31.755$ GWh de energía hidráulica

En este caso, se aprovechan al máximo todos las fuentes de energía no contaminantes, completando con carbón las necesidades totales fijadas.

La matriz de pagos resultante es:

	Coste (ptas/kWh)	Emisiones de CO_2 (g/kWh)
Coste	5,78	962,42
Emisiones de CO_2	8,40	84,41

Los elementos de la diagonal principal se denominan *punto ideal*, es decir, la solución en que ambos objetivos alcanzan su valor óptimo. En la realidad, el punto ideal es inalcanzable, pero resulta útil para determinar la solución más apropiada que sea factible, así como para homogeneizar las unidades de los criterios de decisión. Esta solución más apropiada debe escogerse entre el conjunto de soluciones eficientes. Este conjunto puede aproximarse mediante el *método de las restricciones*.

Este método consiste en optimizar uno de los objetivos, incorporando el otro al conjunto de restricciones, como una restricción paramétrica. Para cada valor que se dé a este parámetro, se obtendrá un punto del conjunto de soluciones eficientes. En nuestro caso, minimizamos el coste, para un conjunto de valores de las emisiones de CO_2 . Este conjunto está delimitado por los valores ideal y anti-ideal de las emisiones, con un incremento de variación de 50 g/kWh.

La formulación es la siguiente:

$$\min f_1(x) = (5,85 x_1 + 8,24 x_2 + 5 x_3 + 9 x_4 + 12 x_5 + 6 x_6) / \Sigma x_i \quad (\text{ptas/kWh})$$

sujeto a las siguientes restricciones

$$\begin{aligned} \sum x_i &\geq 150.000 \text{ GWh} \\ x_i &\geq 0, \forall i \\ x_2 &\leq 53.000 \text{ GWh} \\ x_3 &\leq 12.845 \text{ GWh} \\ x_4 &\leq 3.100 \text{ GWh} \\ x_5 &\leq 40.000 \text{ GWh} \\ x_6 &\leq 31.755 \text{ GWh} \\ f_2(x) &= k, 84,41 < k < 962,42 \end{aligned}$$

Los valores obtenidos se reflejan en la tabla 2.

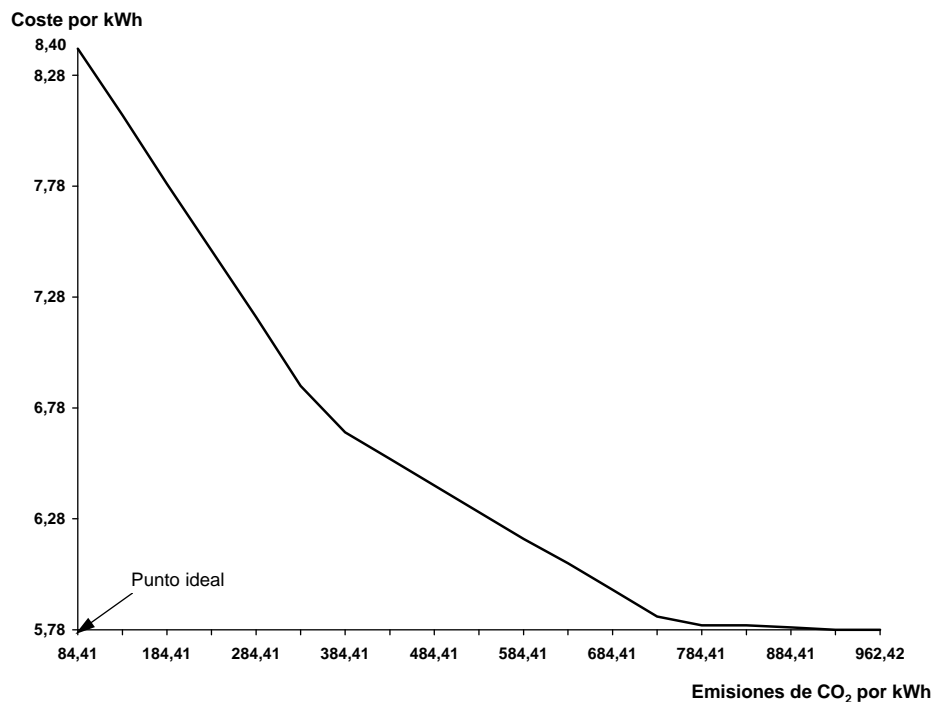
Tabla 2. Conjunto de soluciones eficientes

$f_1(x)$	$f_2(x)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
8,40	84,41	7.400	53.000	12.845	5.000	40.000	31.755
8,10	134,41	14.789	53.000	12.845	5.000	32.611	31.755
7,79	184,41	22.178	53.000	12.845	5.000	25.222	31.755
7,49	234,41	29.567	53.000	12.845	5.000	17.833	31.755
7,19	284,41	36.956	53.000	12.845	5.000	10.444	31.755
6,88	334,41	44.346	53.000	12.845	5.000	3.054	31.755
6,67	384,41	51.735	53.000	12.845	665	-	31.755
6,55	434,41	59.124	46.276	12.845	-	-	31.755
6,43	484,41	66.513	38.887	12.845	-	-	31.755
6,31	534,41	73.902	31.498	12.845	-	-	31.755
6,19	584,41	81.291	24.109	12.845	-	-	31.755
6,08	634,41	88.680	16.719	12.845	-	-	31.755
5,96	684,41	96.070	9.330	12.845	-	-	31.755
5,84	734,41	103.459	1.941	12.845	-	-	31.755
5,80	784,41	110.848	-	12.845	-	-	26.307
5,80	834,41	118.237	-	12.845	-	-	18.918
5,79	884,41	125.626	-	12.845	-	-	11.529
5,78	934,41	133.016	-	12.845	-	-	4.139
5,78	962,42	137.155	-	12.845	-	-	-

En este cuadro se puede observar la distinta participación en la generación eléctrica de las opciones consideradas, en función de la solución elegida. Podemos ver cómo las distintas opciones van entrando en la solución óptima a medida que modificamos el coste de generación y las emisiones de CO₂. Así, por ejemplo, la energía eólica sólo entra en la solución cuando las emisiones de CO₂ se limitan a 384 g/kWh, ascendiendo el coste de generación a 6,67 ptas/kWh. En cambio, si lo que se limita es el coste de generación, por ejemplo, a 5,8 ptas/kWh, sólo tienen cabida en el mix óptimo de generación el carbón, el gas natural, y la energía hidroeléctrica.

Con los valores obtenidos, se ha elaborado la siguiente gráfica, en la que se señala además el punto ideal.

Figura 1. Conjunto eficiente de soluciones



Todas las soluciones representadas en la gráfica por la línea continua son soluciones factibles, y eficientes. Pero para resolver el problema es necesario escoger uno de los puntos. Para ello hace falta introducir las preferencias del centro decisor, ya que serán éstas las que determinen la solución, en función de la importancia que se asigne a la consecución de cada objetivo. En nuestro caso, según se valore más el coste de generación mínimo, o la mínima emisión de CO₂, el punto óptimo se desplazará a lo largo de la curva a la derecha o a la izquierda, respectivamente.

Por lo tanto, la curva presentada ya proporciona una ayuda para la toma de decisiones, ya que muestra todas aquellas soluciones eficientes al problema de optimización, para que el decisor escoja aquella que más se ajusta a sus intereses. Pero aún se puede profundizar más en el análisis, ya que parece que, dentro del conjunto de soluciones, es posible escoger un óptimo, que será aquel que se encuentre más próximo al punto ideal. Esto se consigue mediante la *programación compromiso*, que se describe en el siguiente apartado.

4. Programación compromiso

Esta programación se basa en que, si los centros decisores actúan 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.

Existen muchas distancias, además de la euclidiana, la más conocida, por lo que cabe preguntarse cuál de ellas habría que utilizar. En la realidad, el proceso se simplifica, ya que se ha demostrado que el conjunto de soluciones cuya distancia al punto ideal es mínima, llamado también *conjunto compromiso*, está acotado por los puntos para los que la distancia L_1 o Manhattan, y la distancia L_∞ o Chebysev son mínimas.

Estos puntos no son invariables, ya que dependen de la ponderación que se asigne a la

consecución de cada objetivo, y que debe reflejar las preferencias del centro decisor. Estas ponderaciones se introducen en la expresión de la distancia, de tal manera que resultan:

$$L_1 = W_1 \frac{f_1(x) - F_1}{f_1 - F_1} + W_2 \frac{f_2(x) - F_2}{f_2 - F_2}$$

$$L_\infty = \max[W_1(f_1(x) - F_1), W_2(f_2(x) - F_2)]$$

donde

F_i : valor ideal

f_i : valor anti-ideal

W_i : ponderación de cada objetivo

A modo de ejemplo, se han calculado los conjuntos compromiso para distintos coeficientes de ponderación. Se ha considerado así la asignación del mismo peso a los dos objetivos, asignar dos veces más importancia a uno de ellos, y también cuatro veces más importancia a uno que a otro. Los distintos conjuntos compromiso resultantes aparecen reflejados en la tabla 3.

En ella se puede observar, como resulta evidente, que a medida que se concede más importancia al criterio 2 (minimización de emisiones) sobre el 1 (minimización del coste), el conjunto compromiso se desplaza hacia la izquierda de la curva, con mayores costes de generación, y menores emisiones.

Tabla 3- Conjuntos compromiso para las ponderaciones asignadas.

W_2	1	0,5	0,25
W_1			
1	L_1 : 6,65 / 388,91 L_∞ : 6,67 / 383,13	L_1 : 5,81 / 747,55 L_∞ : 6,40 / 497,87	L_1 : 5,81 / 747,55 L_∞ : 6,17 / 605,51
0,5	L_1 : 6,76 / 355,08 L_∞ : 7,08 / 302,12		
0,25	L_1 : 8,40 / 84,41 L_∞ : 7,52 / 229,92		

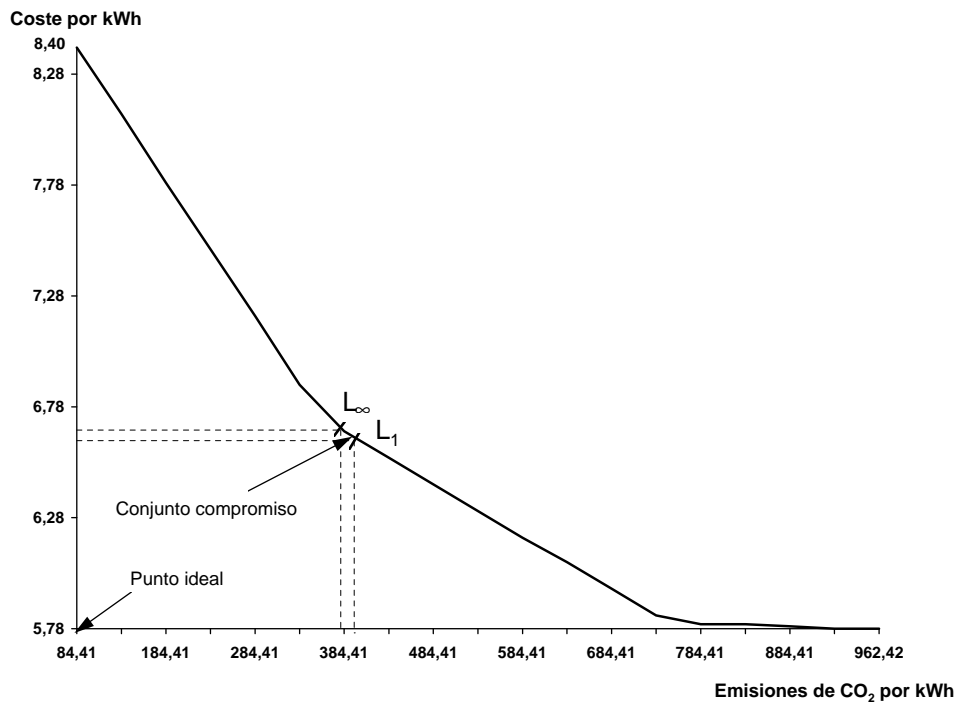
La participación de cada tipo de energía en la solución óptima se puede ver, para cada caso, en la tabla 2, introduciendo el coste de generación o las emisiones de CO₂ correspondientes. Como ilustración, se detalla aquí el conjunto compromiso para el caso en que se asigne la misma importancia a los dos objetivos considerados.

	Distancia L_1	Distancia L_∞
Carbón	52.400 GWh	51.545 GWh

Nuclear	53.000 GWh	53.000 GWh
Gas natural	12.845 GWh	12.845 GWh
Eólica	-	855 GWh
Hidráulica	31.755 GWh	31.755 GWh

Este conjunto compromiso aparece gráficamente en la figura 2.

Figura 2. Conjunto compromiso para pesos iguales de los criterios.



Como se puede observar, la energía eólica ya aparece en este conjunto compromiso, aunque con una baja participación. Sin embargo, la biomasa no aparece, ya que sus costes de generación son demasiado elevados. Para que aparezca la biomasa dentro de la solución óptima, es necesario que el límite de emisiones de CO₂ esté por debajo de 380 g/kWh, y los costes por encima de 6,7 ptas/kWh, como se puede observar en la tabla 2.

Para conseguir que la biomasa entre en el conjunto compromiso, y que la energía eólica tenga una mayor participación, por tanto, hay que asignar un coeficiente de ponderación mayor a la minimización de emisiones que a la minimización de costes, para que así el conjunto compromiso se desplace hacia la izquierda.

5- Conclusiones

Como conclusión a este ejercicio, de carácter ilustrativo, se puede observar cómo la

introducción de otro criterio distinto de los costes de generación, las emisiones de CO₂, modifica el resultado de la planificación eléctrica. En nuestro caso, el carbón se desplaza, introduciéndose opciones más caras, pero con menos emisiones de CO₂. Si las emisiones medias de CO₂ se limitan a 380 g/kWh, la energía eólica y la biomasa aparecen en la solución óptima, aumentando su participación a medida que se reducen las emisiones.

Sin embargo, también se puede observar la importancia de los coeficientes de ponderación otorgados por el centro decisor. En efecto, si se concede la misma importancia a los dos criterios considerados, la energía eólica y la biomasa no participan significativamente en el mix de generación, ya que sus ventajas medioambientales no bastan para compensar sus mayores costes.

Parece evidente, por tanto, que estas energías "limpias" tienen aún un gran obstáculo para su introducción en su todavía elevado coste, ya que sólo entran en la solución óptima cuando se ponderan más los costes medioambientales que los de generación. Si, tal como se prevé, estos costes de generación descienden en los próximos años, la producción eléctrica podría realizarse óptimamente en base a un gran porcentaje de energías renovables, en detrimento del gas natural que, además de contribuir a las emisiones del CO₂, podría ver aumentar su coste en los próximos años.

Por último, es necesario recordar que las simplificaciones utilizadas para este ejercicio hacen muy poco recomendable utilizar los resultados como valores absolutos, sino más bien como indicaciones ante la toma de decisiones. Un análisis más profundo incluiría una mejor definición de los supuestos, y la consideración de un mayor número de criterios para la decisión, como pueden ser otras variables socioeconómicas o medioambientales.

6. Bibliografía

Romero, C. (1993). Teoría de la decisión multicriterio : conceptos, técnicas y aplicaciones. Alianza Editorial, Madrid.

Plan Energético Nacional 1991-2000. SGERM, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.