

# VALORACIÓN DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR OPCIONES REALES: INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA DE COSTES DE EXPLOTACIÓN

Ruiz, F<sup>1</sup>; Solana, P<sup>2</sup>; Liébana, I

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería de Organización, Administración de Empresas y Estadística  
Universidad Politécnica de Madrid  
Correo-e: fruiz@ingor.etsii.upm.es

<sup>2</sup> Departamento de Matemática Aplicada a la Ingeniería Industrial  
Universidad Politécnica de Madrid  
Correo-e: psolana@etsii.upm.es

## Resumen

*Uno de los problemas a los que se enfrentan las empresas generadoras de energía eléctrica es el de obtener una valoración de sus activos de manera que refleje su contribución real al valor de la empresa.*

*Este problema reviste especial importancia en un marco desregulador que promueve las alianzas estratégicas, las fusiones y las ventas de activos. En el presente trabajo se evalúa el precio de venta de dos centrales de producción de energía eléctrica (una de carbón y otra de fuel) basada en la teoría de opciones reales, de manera que se tenga en cuenta el valor añadido de la flexibilidad operativa de la planta. Los resultados obtenidos se comparan con los valores ofrecidos por teorías tradicionales (VAN) y se estudia el valor adicional que la opcionalidad procura, para diferentes hipótesis de evolución de los precios de la energía eléctrica y vidas útiles de las plantas'*

## 1 Introducción

El modelo que se presenta es una aplicación de la teoría de opciones reales a la valoración de dos plantas de producción de energía eléctrica: una alimentada por carbón y la otra con fuel. El enfoque del problema es tratar la planta de generación como un derivado financiero, a modo de una serie de opciones de compra, que puedan ser ejercitadas (explotación de la central, con opción posterior a cerrarla) o ser poseídas con opción de ejercicio futura (mantener la central parada con opción de abrirla después).

El criterio de mantener la planta cerrada o abierta se basa en la comparación de dos valores actualizados:

- el valor ofrecido por la planta en el instante actual en su estado de operación o cierre más la esperanza con expectativas racionales de su valor futuro
- el valor de la planta si se cambia al modo de operación (pasar de cerrada a abierta o de abierta a cerrada)

El problema sigue un esquema de resolución similar al de cualquier ecuación de Bellman: se resuelve del futuro hacia el presente, obteniendo en cada nodo de la malla óptimos locales, que proporcionan un óptimo global (un valor de la central asociado a una secuencia óptima de explotación) en el instante inicial.

La versatilidad del modelo permite distinguir entre las diferentes estructuras de costes de cada central. En este caso, las diferencias estriban básicamente en los precios de los combustibles utilizados. Como variable estocástica se toma el precio del kWh producido, mientras que los precios de los combustibles se consideran constantes. Se está en la actualidad trabajando en la inclusión de la incertidumbre en el precio del combustible en la valoración de la central.

Los resultados obtenidos para cada una de las centrales se comparan con los resultados ofrecidos por la técnica del Valor Actual Neto del proyecto, para diferentes hipótesis de la evolución de los precios y rendimiento de conveniencia.

## 2 Valoración por opciones reales

Se valoran las plantas teniendo en cuenta las opciones de apertura y cierre de que se dispone en función de los niveles de precios en los que se encuentre el kWh, representando el proceso de evolución de precios mediante un árbol binomial. El cálculo del valor del proyecto en el instante actual por el método de los árboles binomiales es equivalente a resolver las ecuaciones en derivadas parciales resultantes por el método explícito. Los detalles de la derivación de las ecuaciones resultantes y de la programación del árbol binomial pueden consultarse en detalle en otros trabajos (ver, por ejemplo, [1]). Sin embargo, merece la pena hacer una serie de consideraciones.

En primer lugar, debe indicarse que las plantas se consideran flexibles en el sentido de permitir su apertura y cierre en momentos óptimos, dependientes exclusivamente del nivel de precios del instante considerado y del valor de los parámetros de los modelos. Cuando la planta está abierta (cerrada) y decide cerrarse (abrirse), el resultado es equivalente a ejercer la opción de cierre (apertura) recibiendo en pago un activo con valor igual al de la planta cerrada (abierta), restando los costes de ejercicio correspondientes al cierre (apertura).

Por tanto, es necesario disponer de ecuaciones que definan el valor de la planta cerrada y el valor de la planta abierta, teniendo en cuenta que, en cualquiera de los dos casos, el valor no sólo tiene en cuenta los flujos de caja generados sino también el valor de la opción de cambiar de un estado a otro.

En el presente análisis se tiene en cuenta diferentes estructuras de costes de arranque (arranque en frío, templado y en caliente), lo que debe reflejarse adecuadamente en las condiciones de contorno de las ecuaciones.

Las ecuaciones resultantes son:

$$\frac{1}{2} \sigma^2 p^2 V_{pp} + (r - \delta) V_p p - rV + (pQ - CT) + V_t = 0$$

$$\frac{1}{2} \sigma^2 p^2 W_{pp} + (r - \delta) W_p p - rW + CF + W_t = 0$$

donde:

$V$  representa el valor de la planta en funcionamiento

$W$  representa el valor de la planta parada

$p$  representa el precio de venta unitario de la energía

$Q$  representa el número de unidades producidas

$CT$  representa los costes totales de producción

$CF$  representa los costes fijos de mantenimiento

$r$  es la rentabilidad sin riesgo

$\delta$  es el rendimiento de conveniencia

$K_j$  y  $p_j^*$  son los costes y precios críticos correspondientes a la situación  $j$

Las condiciones de las ecuaciones diferenciales son:

$$V(p, T) = 0$$
$$W(p, T) = 0$$

para reflejar que, al final de la vida útil, el valor de la planta es nulo en cualquier caso, y las condiciones de optimalidad ([2]):

$$V(p1^*, t) = W(p1^*, t) - K1$$

refleja que, estando la planta en funcionamiento, se decidirá pararla cuando su valor parada exceda en  $K1$  al valor abierta, siendo  $p1^*$  el precio para el que, estando en funcionamiento, interesaría cerrarla.

$$V_p(p1^*, t) = W_p(p1^*, t)$$

Para imponer la condición de continuidad de la derivada en el punto  $p1^*$ .

$$W(p2^*, t) = V(p2^*, t) - K2$$

Para tener en cuenta que, estando la planta en parada de corta duración, se decidirá volver a su funcionamiento cuando su valor en este último estado exceda en  $K2$  al valor parada, siendo  $p2^*$  el precio de venta para el que se tomaría esta decisión.

$$W_p(p2^*, t) = V_p(p2^*, t)$$

Como condición de continuidad de la derivada en el punto  $p2^*$ .

$$W(p3^*, t) = V(p3^*, t) - K3$$

Que refleja que, estando la planta en parada de larga duración, se decidirá volver a régimen de funcionamiento cuando su valor en este último estado exceda en  $K3$  al valor de parada, siendo  $p3^*$  el precio de venta que cumple esta condición.

$$W_p(p3^*, t) = V_p(p3^*, t)$$

Que representa la condición de continuidad de la derivada en el punto  $p3^*$ .

### 3 Resultados

Se ha evaluado el valor de dos centrales de producción (carbón y fuel) a partir de datos estándar de costes para cada una de las centrales.

Las hipótesis de precios y rentabilidades son comunes para la valoración de las dos plantas y son las siguientes:

- Distribuciones de precios logarítmico normales con volatilidad del 20%
- Consideración de distintas alternativas de precios del kWh en el instante inicial: entre 2 y 11 pta para la central de carbón y entre 4 y 11 pta para la central de fuel.
- Vida útil de 25 años para cada central, con valor residual nulo.

Los datos de costes para cada central se presentan a continuación:

### Central de carbón

<i>Costes variables</i>	
Punto de funcionamiento	330000 kW
Coste variable	3 pta/kWh
<i>Coste arranque (pta)</i>	
Frío	2500000 >48 h
Templado	2400000 >24h, <48h
Caliente	2300000 <24 h
Costes fijos de la planta (pta/año)	1200000000

Tabla 1

### Central de fuel

<i>Costes variables</i>	
Punto de funcionamiento	200000 kW
Coste variable	6 pta/kWh
<i>Coste arranque (pta)</i>	
Frío	1400000 >48 h
Templado	1000000 >24h, <48h
Caliente	900000 <24 h
Costes fijos de la planta (pta/año)	800000000

Tabla 2

### 3.1 Resultados para la central de carbón

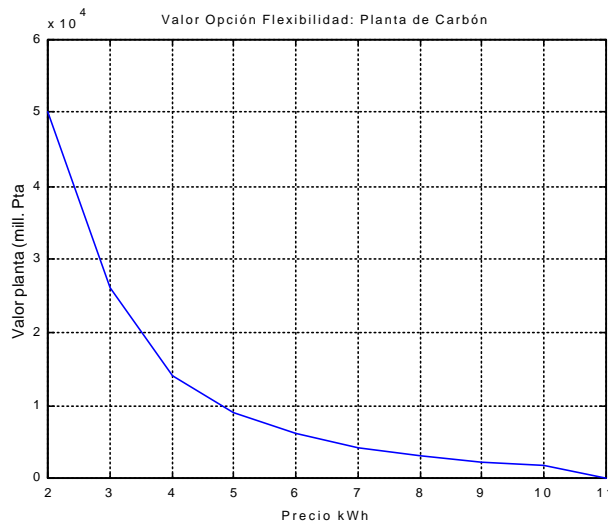
De la Tabla 3 y Gráfica 1 se puede extraer las siguientes conclusiones:

- Los valores de la central, con y sin flexibilidad, son siempre crecientes con el precio inicial
- El valor de la opción de apertura o cierre es decreciente con el precio inicial, lógicamente debido a la decreciente justificación económica de cierre a medida que el precio del kWh es más elevado, llegando a valer cero para precios suficientemente altos.
- El valor de la planta con flexibilidad es positivo para precios iniciales del kWh inferiores al coste variable debido a que se aprovechará en el futuro los periodos de precio elevado para producir y no se producirá cuando el precio sea bajo.
- El valor de la planta sin flexibilidad es positivo, aunque menor que el correspondiente con flexibilidad, para valores del kWh inferiores al coste variable debido a la hipótesis implícita en la distribución de precios logarítmico normal

considerada, por la que la media de los precios crece, en función del tiempo, según el factor  $e^{m-d}$ , siendo  $m$  la rentabilidad total o coste de oportunidad del bien producido y  $d$  la rentabilidad por tenencia. En este caso se ha considerado  $m=r$  (rentabilidad sin riesgo).

CENTRAL DE CARBÓN			
Rentabilidad por tenencia	0,02		
Volatilidad	0,2		
Vida útil (años)	25		
	Valor de la Planta (mill. pta)		Valor de la Opción
Precio Inicial (pta/kWh)	Sin flexibilidad	Con flexibilidad	
2	-48201	1931	50132
3	8678	34654	25976
4	65976	80045	14069
5	122425	131521	9096
6	179223	185363	6140
7	236321	240547	4226
8	293098	296241	3143
9	350021	352381	2360
10	406982	408900	1918
11	465142	465142	0

Tabla 3

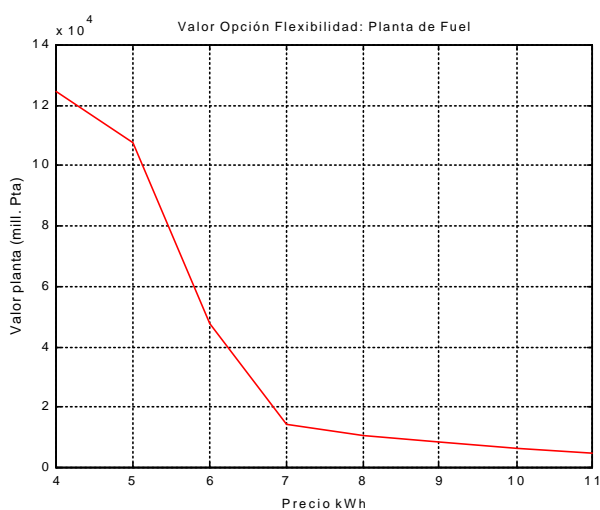


Gráfica 1

### 3.2 Resultados para la central de fuel

CENTRAL DE FUEL			
Rentabilidad por tenencia	0,02		
Volatilidad	0,2		
Vida útil (años)	25		
	Valor de la Planta (mill. pta)		Valor de la Opción
Precio Inicial (pta/kWh)	Sin flexibilidad	Con flexibilidad	
4	-119325	5326	124651
5	-86143	21342	107485
6	-2140	45487	47627
7	49499	63697	14198
8	74610	85316	10706
9	99720	108007	8287
10	124831	131382	6551
11	149942	154661	4720

Tabla 4



Gráfica 2

De la Tabla 4 y Gráfica 2 correspondientes a la central de fuel se deduce lo siguiente:

- Al igual que para la central de carbón, los valores de la central, con y sin flexibilidad, son siempre crecientes con el precio inicial. Además, el valor de la opción de apertura o cierre es decreciente con el precio inicial
- El valor de la central de fuel, corregido por la potencia de funcionamiento, es siempre menor que el valor de la central de carbón, lo que tiene pleno sentido a la vista de los costes marginales de cada una de las centrales.

- Mismos comentarios que en el caso de la central de carbón en cuanto a valores de la central con flexibilidad para precios del kWh inferiores al coste variable.
- Para los precios considerados no se aprecia, en este caso, valores positivos de la central sin flexibilidad para precios del kWh inferiores al coste variable.

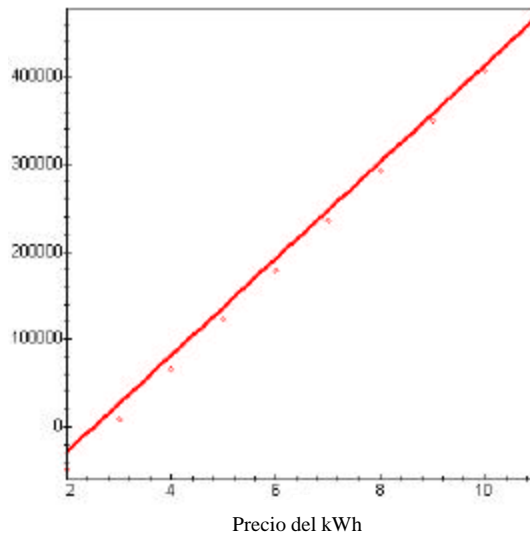
#### 4 Valoración por el método del VA

El método del VA se basa en el cálculo de la suma de los flujos de caja esperados actualizados al coste de oportunidad correspondiente a su riesgo. Para cada periodo considerado (un año) debe estimarse el flujo de caja en función de la esperanza de los precios para tal periodo. En el presente caso, y para guardar coherencia con el modelo de precios empleado en los árboles binomiales, se ha empleado la evolución de la esperanza de la distribución logarítmico normal, es decir, empleando el factor  $e^{m \cdot d}$ , para diferentes valores de  $m$

##### 4.1 Central de carbón

En la Gráfica 3 se muestra el valor del VA (línea continua) dado por la fórmula tradicional (teniendo en cuenta la esperanza del precio coherente con el modelo logarítmico normal empleado) y el resultado de ejecutar el código del árbol binomial con la planta siempre funcionando (puntos). Se observa la similitud de los resultados obtenidos. A continuación, se comparan los valores del VA, la planta no flexible y la flexible para diferentes valores de  $m$

Valoración en mill. Pta



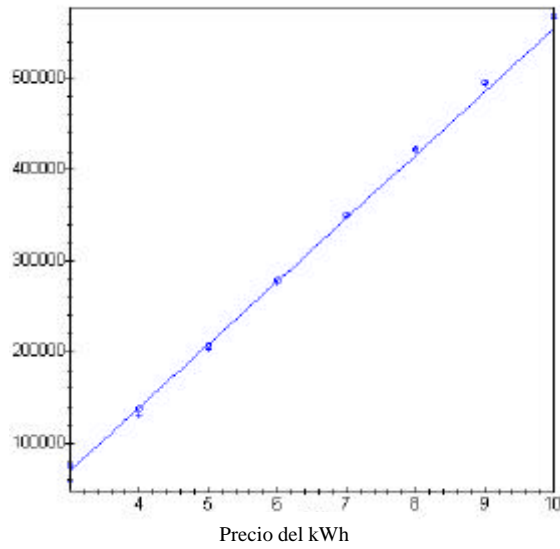
Gráfica 3

La tasa de descuento empleada para el cálculo del VA en la fórmula anterior es la empleada en el árbol: el 4%. Lógicamente, para tasas de descuento diferentes la pendiente de la función VA cambiará y tenderá a alejarse del resultado del código.

### Valoración con $m=0.06$

Línea continua: VA  
Puntos: Valor planta flexible  
Cruces: valor planta inflexible

Valoración en mill. Pta

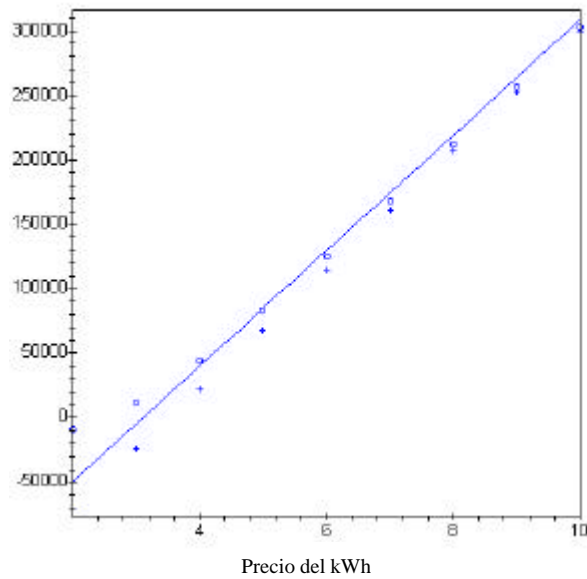


Gráfica 4

### Valoración con $m=0.02$

Línea continua: VA  
Puntos: Valor planta flexible  
Cruces: valor planta inflexible

Valoración en mill. Pta



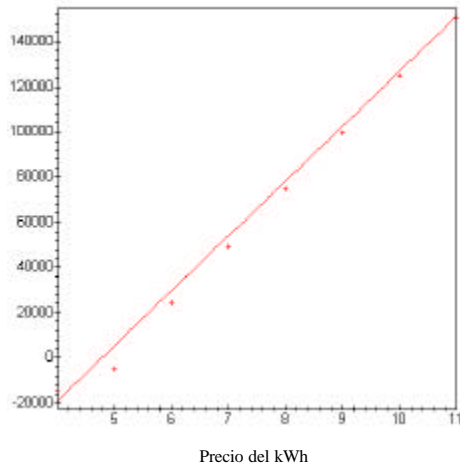
Gráfica 5



## 4.2 Central de fuel

La Gráfica 6 muestra el resultado de emplear la fórmula del VA para la central de fuel (línea continua), comparado con el valor de la central de fuel obtenido con el árbol binomial con la hipótesis de funcionamiento continuo.

Valoración en mill. Pta

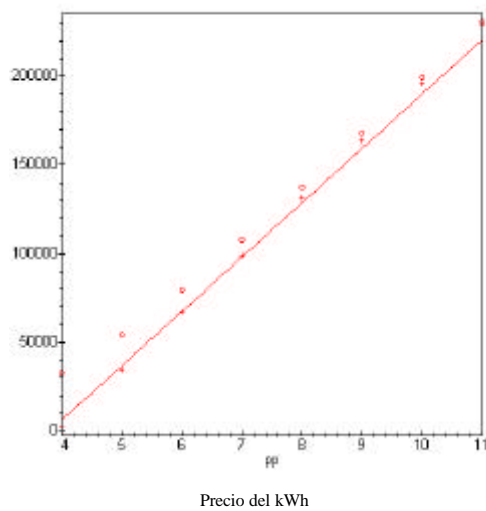


Gráfica 6

## Valoración con $m=0.06$

Línea continua: VA  
Puntos: Valor planta flexible  
Cruces: valor planta inflexible

Valoración en mill. Pta

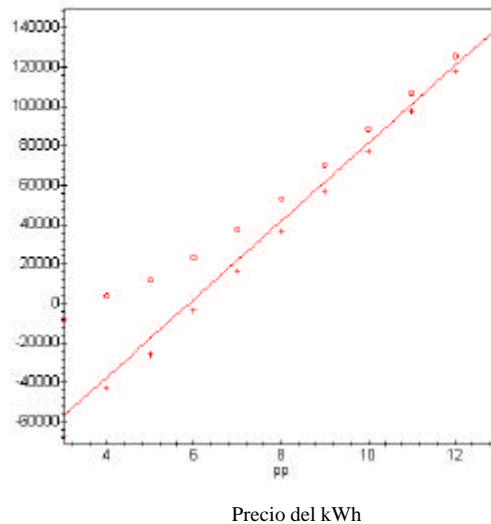


Gráfica 7

## Valoración con $m=0.02$

Línea continua: VA  
Puntos: Valor planta flexible  
Cruces: valor planta inflexible

Valoración en mill. Pta



Gráfica 8

## 5 Conclusiones

Se dispone de un método de valoración de activos de empresas generadoras de energía eléctrica versátil y robusto, que captura los siguientes elementos:

- Flexibilidad operativa de las plantas
- Estructuras de costes fijos y variables adecuables a cada caso
- Sensibilidad a los parámetros de evolución de los precios
- Valor de la opcionalidad explícito, frente al resultado del VAN

Una vez probada la validez de la herramienta se debe, en el futuro, alimentar con modelos de precios más completos y, deseablemente además, con como segunda variable estocástica el precio del combustible.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Ruiz, F; Fernández, M<sup>a</sup> C.; Pesquero, M<sup>a</sup> B.; Solana, P.; Castrillo, M. (2000) Valoración de una planta de producción de energía eléctrica empleando la teoría de opciones, I Workshop de Ingeniería de Organización, Bilbao.
2. Dixit A., Pindyck R.,(1994) Investment under uncertainty, Princeton University Press.